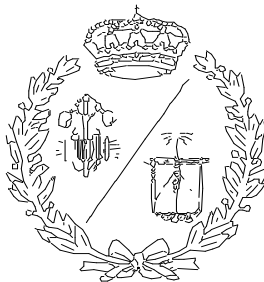


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE UNA  
PLACA DE INDUCCIÓN EN SOFTWARE  
“ANSYS”**

**(Electromagnetic simulation of an induction  
plate in software “Ansys”)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Roberto González González

Octubre - 2020

# ÍNDICE

<b>1 AGRADECIMIENTOS</b>	<b>14</b>
<b>2 RESUMEN</b>	<b>15</b>
<b>3 SUMMARY</b>	<b>16</b>
<b>4 OBJETIVOS DEL TFG</b>	<b>17</b>
<b>5 INTRODUCCIÓN</b>	<b>18</b>
5.1 COCINAR EN LA PREHISTORIA	18
5.2 COCINA ECONÓMICA	20
5.3 COCINAS DE GAS	22
5.4 COCINAS ELÉCTRICAS	25
5.5 COCINAS DE INDUCCIÓN	29
<b>6 DESCRIPCIÓN TEÓRICA DEL DISPOSITIVO</b>	<b>33</b>
<b>7 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>38</b>
7.1 LEY DE FARADAY-LENZ	39
7.2 FORMAS DE OBTENER CORRIENTES INDUCIDAS	40
7.3 LEY DE BIOT-SAVART	42
7.4 GENERACIÓN DE CALOR	45
<b>8 CÁLCULOS</b>	<b>51</b>
<b>9 SIMULACIÓN</b>	<b>59</b>
9.1 SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	59
9.2 SIMULACIÓN TÉRMICA TRANSITORIA	70
<b>10 RESULTADOS</b>	<b>76</b>
10.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	76
10.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA TRANSITORIA	95
10.3 VALIDACIÓN DE RESULTADOS	105
10.4 MODIFICACIONES EN EL DISEÑO	106
10.4.1 MODIFICACIÓN EN EL ESPESOR DEL CRISTAL VITROCERÁMICO	106
10.4.2 MODIFICACIÓN EL DIÁMETRO DEL RECIPIENTE FERROMAGNÉTICO	118
<b>11 CONCLUSIONES</b>	<b>131</b>
<b>12 BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>133</b>

# ÍNDICE DE IMÁGENES

<b>Ilustración 1.</b> Primeros humanos cocinando con fuego (Gastromakers, 2019).. <b>Pág.19</b>
<b>Ilustración 2.</b> Cocina económica (Maldonadoliceth.blogspot.com, 2016) ..... <b>Pág.21</b>
<b>Ilustración 3.</b> Cocina de gas (Mediamarkt, 2020) ..... <b>Pág.23</b>
<b>Ilustración 4.</b> Cocina vitrocerámica (Electrodomésticos Maher, 2020) ..... <b>Pág.28</b>
<b>Ilustración 5.</b> Placa de inducción (Teka, 2020) ..... <b>Pág.31</b>
<b>Ilustración 6.</b> Esquema de funcionamiento de una placa de inducción (García Álvarez, José Antonio. Así funciona, 2016) ..... <b>Pág.34</b>
<b>Ilustración 7.</b> Sección rectangular de lado móvil, atravesada por un campo magnético uniforme..... <b>Pág.40</b>
<b>Ilustración 8.</b> Movimiento de una espira perpendicular a un campo magnético uniforme. (Leandro Bautista. Fisicanet, 2016) ..... <b>Pág.41</b>
<b>Ilustración 9.</b> Diferencial de campo magnético creado por un diferencial de corriente eléctrica. (Martín Blas, Teresa y Serrano Fernández, Ana. Universidad Politécnica de Madrid) ..... <b>Pág.43</b>
<b>Ilustración 10.</b> Diferencial de campo magnético creado por un diferencial de corriente eléctrica de una bobina. (Martín Blas, Teresa y Serrano Fernández, Ana. Universidad Politécnica de Madrid) ..... <b>Pág.44</b>
<b>Ilustración 11.</b> Ciclo de histéresis magnética. (Fenómenos magnéticos y electromagnéticos, lkastaroak.birt.eus) ..... <b>Pág.47</b>

<b>Ilustración 12.</b> Densidad de corriente alterna por un conductor (imagen de la izquierda) y densidad de corriente continua en un conductor (imagen de la derecha). (Factor eléctrico blogspot, 2015) .....	<b>Pág.49</b>
<b>Ilustración 13.</b> Diferentes profundidades superficiales en función de la frecuencia. (Efecto pelicular, EcuRed. Agosto,2019) .....	<b>Pág.49</b>
<b>Ilustración 14.</b> Placa IZC 64630 BK MST. (Teka,2020) .....	<b>Pág.51</b>
<b>Ilustración 15.</b> Ficha técnica de la placa de inducción (Teka,2020) .....	<b>Pág.51</b>
<b>Ilustración 16.</b> Interior de la placa de inducción IZC 64630 BK MST (Foto adjuntada por el equipo de I+D de Teka) .....	<b>Pág.52</b>
<b>Ilustración 17.</b> Tabla normalizada de conductores de cobre. (Unicrom electrónica) .....	<b>Pág.53</b>
<b>Ilustración 18.</b> Representación de la intensidad de las líneas de campo magnético (Simulación en software Flux) .....	<b>Pág.55</b>
<b>Ilustración 19.</b> Representación de la distribución de las líneas de campo magnético (Simulación en software Flux) .....	<b>Pág.55</b>
<b>Ilustración 20.</b> Zona de trabajo de las líneas de campo magnético en el eje Z.	<b>Pág.56</b>
<b>Ilustración 21.</b> Zona de trabajo de las líneas de campo magnético en el eje X.	<b>Pág.57</b>
<b>Ilustración 22.</b> Sección transversal que atraviesa las líneas de campo.....	<b>Pág.58</b>
<b>Ilustración 23.</b> Operador Maxwell 3D (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.59</b>
<b>Ilustración 24.</b> Ventana de identificación del problema (simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.60</b>

<b>Ilustración 25.</b> Ventana de propiedades de diseño de la bobina (simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.60</b>
<b>Ilustración 26.</b> Bobina inductora (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.61</b>
<b>Ilustración 27.</b> Cajas situadas encima del inicio y final de la bobina (Introduction to Ansys Maxwell, Eddy current analysis) .....	<b>Pág.62</b>
<b>Ilustración 28.</b> Generación del conductor que une los terminales de la bobina (Introduction to Ansys Maxwell, Eddy current analysis) .....	<b>Pág.62</b>
<b>Ilustración 29.</b> Bobina inductora con conductor que une los terminales incorporado (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.63</b>
<b>Ilustración 30.</b> Cristal vitrocerámico apoyado sobre bobina inductora (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.64</b>
<b>Ilustración 31.</b> Base del recipiente ferromagnético apoyado en cristal vitrocerámico (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.64</b>
<b>Ilustración 32.</b> Plano donde se encuentran los terminales de la bobina inductora (Introduction to Ansys Maxwell, Eddy current analysis) .....	<b>Pág.65</b>
<b>Ilustración 33.</b> Terminal de entrada de la bobina inductora (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.65</b>
<b>Ilustración 34.</b> Skin Depth (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.67</b>
<b>Ilustración 35.</b> Región (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.67</b>
<b>Ilustración 36.</b> Parámetros necesarios para el análisis (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.68</b>
<b>Ilustración 37.</b> Mallado de la cara más próxima a la bobina inductora (izquierda) y de la cara más alejada (derecha) (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.69</b>

<b>Ilustración 38.</b> Operador, cálculo de las pérdidas magnéticas (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.70</b>
<b>Ilustración 39.</b> Valor de las pérdidas para 23 kHz (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.70</b>
<b>Ilustración 40.</b> Operador de simulador térmico transitorio (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.71</b>
<b>Ilustración 41.</b> Lista de materiales en Engineering Data (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.71</b>
<b>Ilustración 42.</b> Lista de propiedades del hierro (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.72</b>
<b>Ilustración 43.</b> Geometría vista desde el Design Modeler (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.72</b>
<b>Ilustración 44.</b> Geometría vista desde el Set Up (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.73</b>
<b>Ilustración 45.</b> Mallado de la cara más próxima a la bobina inductora y más alejada del recipiente ferromagnético (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.73</b>
<b>Ilustración 46.</b> Importación de la generación de calor en la base del recipiente ferromagnético (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.74</b>
<b>Ilustración 47.</b> Convección aplicada a la cara superior de la base del recipiente ferromagnético (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.74</b>
<b>Ilustración 48.</b> Condiciones de contorno de la simulación (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.75</b>
<b>Ilustración 49.</b> Temperatura inicial a la que se encuentra la base del recipiente ferromagnético (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.75</b>

<b>Ilustración 50.</b> Inducción magnética para 20 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.77</b>
<b>Ilustración 51.</b> Inducción magnética para 23 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.77</b>
<b>Ilustración 52.</b> Inducción magnética para 30 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.78</b>
<b>Ilustración 53.</b> Inducción magnética para 40 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.78</b>
<b>Ilustración 54.</b> Inducción magnética para 50 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.79</b>
<b>Ilustración 55.</b> Inducción magnética para 60 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.79</b>
<b>Ilustración 56.</b> Inducción magnética para 0° (Simulación en software Ansys) ..	<b>Pág.81</b>
<b>Ilustración 57.</b> Inducción magnética para 30° (Simulación en software Ansys).	<b>Pág.81</b>
<b>Ilustración 58.</b> Inducción magnética para 60° (Simulación en software Ansys).	<b>Pág.81</b>
<b>Ilustración 59.</b> Inducción magnética para 90° (Simulación en software Ansys).	<b>Pág.81</b>
<b>Ilustración 60.</b> Campo magnético para 20 kHz (Simulación en software en Ansys)	<b>Pág.82</b>
<b>Ilustración 61.</b> Campo magnético para 23 kHz (Simulación en software en Ansys)	<b>Pág.82</b>
<b>Ilustración 62.</b> Campo magnético para 30 kHz (Simulación en software en Ansys)	<b>Pág.83</b>

<b>Ilustración 63.</b> Campo magnético para 40 kHz (Simulación en software en Ansys)	<b>Pág.83</b>
<b>Ilustración 64.</b> Campo magnético para 50 kHz (Simulación en software en Ansys)	<b>Pág.84</b>
<b>Ilustración 65.</b> Campo magnético para 60 kHz (Simulación en software en Ansys)	<b>Pág.84</b>
<b>Ilustración 66.</b> Curva de imanación de un material ferromagnético (Januario, Marconi. Modelo de transformador en función de la frecuencia. Abril, 2017)	<b>Pág.85</b>
<b>Ilustración 67.</b> Densidad de corriente para 20 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.87</b>
<b>Ilustración 68.</b> Densidad de corriente para 23 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.87</b>
<b>Ilustración 69.</b> Densidad de corriente para 30 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.88</b>
<b>Ilustración 70.</b> Densidad de corriente para 40 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.88</b>
<b>Ilustración 71.</b> Densidad de corriente para 50 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.89</b>
<b>Ilustración 72.</b> Densidad de corriente para 60 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.89</b>
<b>Ilustración 73.</b> Pérdidas óhmicas para 20 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.91</b>
<b>Ilustración 74.</b> Pérdidas óhmicas para 23 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.91</b>



<b>Ilustración 75.</b> Pérdidas óhmicas para 30 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.92</b>
<b>Ilustración 76.</b> Pérdidas óhmicas para 40 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.92</b>
<b>Ilustración 77.</b> Pérdidas óhmicas para 50 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.93</b>
<b>Ilustración 78.</b> Pérdidas óhmicas para 60 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.93</b>
<b>Ilustración 79.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para 20 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.96</b>
<b>Ilustración 80.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para 23 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.96</b>
<b>Ilustración 81.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para 30 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.97</b>
<b>Ilustración 82.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para 40 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.97</b>
<b>Ilustración 83.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para 50 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.98</b>
<b>Ilustración 84.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para 60 kHz (Simulación en software Ansys)	<b>Pág.98</b>

<b>Ilustración 85.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para 20 kHz (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.100</b>
<b>Ilustración 86.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para 23 kHz (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.100</b>
<b>Ilustración 87.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para 30 kHz (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.101</b>
<b>Ilustración 88.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para 40 kHz (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.101</b>
<b>Ilustración 89.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para 50 kHz (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.102</b>
<b>Ilustración 90.</b> Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para 60 kHz (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.102</b>
<b>Ilustración 91.</b> Temperaturas en función del tiempo para las distintas frecuencias (Gráfica importada de Excel) .....	<b>Pág.104</b>
<b>Ilustración 92.</b> Temperaturas en función del tiempo para las distintas frecuencias (Gráfica importada de Excel) .....	<b>Pág.104</b>
<b>Ilustración 93.</b> Distribución de la inducción magnética para un espesor de 3 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.107</b>
<b>Ilustración 94.</b> Distribución de la inducción magnética para un espesor de 5 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.107</b>

<b>Ilustración 95.</b> Distribución de la inducción magnética para un espesor de 7 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.108</b>
<b>Ilustración 96.</b> Distribución de las líneas de campo magnético para un espesor de 3 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.109</b>
<b>Ilustración 97.</b> Distribución de las líneas de campo magnético para un espesor de 5 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.109</b>
<b>Ilustración 98.</b> Distribución de las líneas de campo magnético para un espesor de 7 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.110</b>
<b>Ilustración 99.</b> Distribución de la densidad de corriente para un espesor de 3 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.111</b>
<b>Ilustración 100.</b> Distribución de la densidad de corriente para un espesor de 5 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.111</b>
<b>Ilustración 101.</b> Distribución de la densidad de corriente para un espesor de 7 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.112</b>
<b>Ilustración 102.</b> Distribución de las pérdidas óhmicas para un espesor de 3 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.113</b>
<b>Ilustración 103.</b> Distribución de las pérdidas óhmicas para un espesor de 5 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.113</b>
<b>Ilustración 104.</b> Distribución de las pérdidas óhmicas para un espesor de 7 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.114</b>
<b>Ilustración 105.</b> Distribución de la temperatura para un espesor de 3 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.115</b>
<b>Ilustración 106.</b> Distribución de la temperatura para un espesor de 5 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.115</b>

<b>Ilustración 107.</b> Distribución de la temperatura para un espesor de 7 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.116</b>
<b>Ilustración 108.</b> Gráfica de temperatura en función del tiempo para los diferentes espesores (Gráfica importada de Excel) .....	<b>Pág.117</b>
<b>Ilustración 109.</b> Vista superior e inferior del diseño para un diámetro de la base del recipiente de 150 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.118</b>
<b>Ilustración 110.</b> Vista superior e inferior del diseño para un diámetro de la base del recipiente de 220 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.119</b>
<b>Ilustración 111.</b> Distribución de la inducción magnética para un diámetro de 150 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.120</b>
<b>Ilustración 112.</b> Distribución de la inducción magnética para un diámetro de 185 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.120</b>
<b>Ilustración 113.</b> Distribución de la inducción magnética para un diámetro de 220 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.121</b>
<b>Ilustración 114.</b> Distribución de las líneas de campo magnético para un diámetro de 150 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.122</b>
<b>Ilustración 115.</b> Distribución de las líneas de campo magnético para un diámetro de 185 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.122</b>
<b>Ilustración 116.</b> Distribución de las líneas de campo magnético para un diámetro de 220 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.123</b>
<b>Ilustración 117.</b> Distribución de corrientes para diámetro de 150 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.124</b>
<b>Ilustración 118.</b> Distribución de corrientes para diámetro de 185 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.124</b>

<b>Ilustración 119.</b> Distribución de corrientes para un diámetro de 220 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.125</b>
<b>Ilustración 120.</b> Distribución de pérdidas óhmicas para un diámetro de 150 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.126</b>
<b>Ilustración 121.</b> Distribución de pérdidas óhmicas para un diámetro de 185 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.126</b>
<b>Ilustración 122.</b> Distribución de pérdidas óhmicas para un diámetro de 220 mm (Simulación electromagnética en software Ansys) .....	<b>Pág.127</b>
<b>Ilustración 123.</b> Distribución de la temperatura para un diámetro de 150 mm (Simulación electromagnética en software Ansys) .....	<b>Pág.128</b>
<b>Ilustración 124.</b> Distribución de la temperatura para un diámetro de 185 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.128</b>
<b>Ilustración 125.</b> Distribución de la temperatura para un diámetro de 220 mm (Simulación en software Ansys) .....	<b>Pág.129</b>
<b>Ilustración 126.</b> Gráfica de temperatura en función del tiempo para los diferentes diámetros del recipiente (Gráfica importada de Excel) .....	<b>Pág.130</b>

# 1 AGRADECIMIENTOS

La realización de este proyecto supone un punto final en una etapa que ha sido y será muy importante en mi vida, una etapa llena de buenos y no tan buenos momentos, en la que, sin duda, he aprendido mucho, no sólo a nivel académico sino también a nivel personal. Por lo tanto, me gustaría aprovechar esta ocasión para agradecer a aquellas personas que me han acompañado durante esta fase de mi vida. En primer lugar, a mi familia, siempre mostrándome su apoyo incondicional y ayudándome en todo lo posible. Mis amigos, necesarios para airearme después de tantas tardes de estudio, y con los que he tenido la suerte de compartir esta etapa universitaria, una etapa de mucho trabajo, pero también de muchos buenos momentos. Y a mis compañeros de clase, un grupo de personas con los que ha sido un placer poder contar con ellos, y con los que espero poder seguir contando en el futuro.

Agradecer a mis tutores de este proyecto, Dr. Alberto Arroyo Gutiérrez y Dr. Sergio Sánchez Bustamante, quienes con profesionalidad, paciencia y trabajo han conseguido que logre realizar este proyecto. La amabilidad, predisposición y colaboración que me han mostrado han hecho que trabaje en un entorno muy agradable y haya aprendido mucho. Mencionar y agradecer al Dr. Luis Mantilla Peñalba, quien de forma totalmente desinteresada me ha ofrecido su apoyo y ayuda a lo largo de todo el proyecto.

Por último, como se observará a lo largo del trabajo, no hubiera sido posible su realización sin la colaboración de la empresa TEKA, con la que tuve el placer de realizar las prácticas. Agradecer a todo el equipo de R&D de haberme hecho disfrutar de una tan buena primera toma de contacto con el mundo laboral, y en especial a D. Andrés Renés, mi tutor de la empresa con quien he aprendido muchísimo e hizo que mi estadía fuese tan agradable, además de colaborar y proporcionarme todos los datos necesarios para la realización de este trabajo.

## 2 RESUMEN

Las cocinas de inducción funcionan a partir de una bobina enrollada por la que al pasar corriente por esta crea un campo magnético que al entrar en contacto con un recipiente ferromagnético produce energía calorífica y lo calienta. Estas cocinas han irrumpido fuertemente en el mercado europeo en el siglo XXI. Su seguridad y eficiencia energética han hecho que se abran un hueco en el sector de la cocina doméstica y se impongan a las vitrocerámicas o cocinas de gas convencionales. Las principales ventajas que presenta es que son más seguras que las cocinas de gas debido a que no hay riesgo de combustión; y frente a las vitrocerámicas, pese a necesitar una mayor inversión inicial, su eficiencia energética permite obtener un gran ahorro en la electricidad. Sin embargo, una desventaja que presenta es que los recipientes deben poseer una base ferromagnética para que funcionen, no serán válidos para estas cocinas los recipientes de aluminio, vidrio, cerámica o cobre.

En este proyecto se procederá a realizar una simulación electromagnética de una placa de inducción (cuyos datos reales han sido facilitados por la empresa Teka), mediante el software “Ansys”, con el objetivo de estudiar su eficiencia energética. Para un mejor estudio del sistema, se llevará a cabo una simulación térmica transitoria de éste, tomando como partida la simulación anterior. En este proyecto se comenzará realizando una introducción del progreso evolutivo que han sufrido las cocinas domésticas a lo largo de la historia, desde el descubrimiento del fuego, hito histórico que permitió al ser humano comenzar a cocinar, hasta las cocinas de inducción. Se describirá el dispositivo a estudio explicando su funcionamiento y los diferentes componentes por los que está formado. Previamente a la simulación, se mostrarán los datos y características de la placa real, y se desarrollarán los fundamentos teóricos y formulación necesaria para este estudio. Se realizarán las simulaciones anteriormente citadas, y se explicarán los pasos dados con las imágenes y gráficos pertinentes para su completo entendimiento. Por último, se comentarán los resultados obtenidos, así como las ideas que se obtengan de las modificaciones que se le realicen al diseño.

### 3 SUMMARY

Induction hobs operate from a coil that when current pass through it creates a magnetic field, when the electrical circuit is closed for a ferromagnetic vessel produces and heats heat energy. These hobs have become very popular into the European market in the 21st century. Their safety and energy efficiency have opened a gap in the domestic kitchen sector and imposed on conventional ceramic or gas hobs. The main advantages it presents is that they are safer than gas hobs because these are not a risk of combustion; and compared to vitroceramic hobs, despite needing greater initial investment, its energy efficiency allows for greats savings in electricity. However, the main disadvantage is that the vessels must have a ferromagnetic base them to work, aluminium, glass, ceramic, or copper Will not be valid for these hobs.

This project will develop an electromagnetic simulation of an induction hob (whose data have been provided by the company TEKA), using the software “Ansys”, with the aim of studying its energy efficiency. For a better study of the system, a transient thermal simulation of the system will be carried out, taking advantage of the previous simulation. This project will begin by introducing the evolutionary progress that domestic hobs have suffered over the years, from the discovery of fire, a historical milestone that allowed humans to being cooking, to induction hobs. The device to be studied will be described explaining its operation and the different components by which it is formed. Before the simulation, the data and characteristics of the hob will be displayed, and the theoretical fundamentals and formulation necessary for this study will be developed. The simulations will be performed, and the steps taken with the relevant images and graphics will be explained for its complete understanding. Finally, the results obtained as well as the ideas obtained from the modifications made to the design will be discussed.



## 4 OBJETIVOS DEL TFG

- Informar de la importancia de las cocinas de inducción en la actualidad
- Repasar la evolución tecnológica que han sufrido las cocinas domésticas
- Entender el funcionamiento de una cocina de inducción y que elementos lo componen
- Obtener las magnitudes y distribuciones de los parámetros característicos de la placa de inducción mediante la simulación electromagnética
- Validar los datos obtenidos en la simulación con los datos reales
- Analizar el comportamiento de la placa de inducción ante diferentes modificaciones que se pudieran realizar sobre su diseño con el fin de conseguir un mejor rendimiento

## 5 INTRODUCCIÓN

El descubrimiento del fuego, según estudios arqueológicos, se le adjudica al Homo Erectus, hace 1.6 millones de años atrás. Este hallazgo trajo consigo dos ventajas para el ser humano: resguardarse del frío y cocinar. Poder cocinar sus alimentos les permitió poder conservar más tiempo su comida y evitar muchas enfermedades de las que se contagiaban en aquella época por ingerir los alimentos crudos, ya que el fuego extermina parásitos y bacterias (Marino, 2018)<sup>1</sup>. Es en el neolítico, hace aproximadamente 12.000 años, en Oriente Medio, cuando las primeras civilizaciones dejan de ser nómadas y comienzan a ser pueblos sedentarios, pueblos con hogar permanente. (Ibañez, 2009)<sup>2</sup> A partir de la adopción de este nuevo estilo de vida los seres humanos comienzan progresivamente a esforzarse en mejorar sus viviendas de acuerdo con sus hábitos cotidianos, entre otros, la necesidad de cocinar.

A continuación, se procede a realizar un repaso histórico de los avances acontecidos en el cocinado, desde el cocinado directo con fuego hasta la cocina de inducción:

### 5.1 COCINAR EN LA PREHISTORIA

El conocimiento de la dieta y los primeros hábitos de los seres humanos parece difícil de demostrar debido a que ya hacen muchos años de estos. Sin embargo, el conocimiento de la fauna y la flora de cada una de las etapas junto a un criterio geográfico nos indican una gran aproximación de qué vegetales y animales consumían; añadido a esto, un análisis químico y ocular de los restos humanos encontrados nos aproximarán a una respuesta más cierta. Así es, la forma de la mandíbula, los grupos musculares y la disposición y forma de los dientes nos determinan los hábitos alimentarios de sus poseedores. Unos dientes gruesos y planos son propios de una alimentación de tipo vegetal, mientras que unos dientes más afilados son de una alimentación de tipo carnívora. Los investigadores también estudian mediante microscopios electrónicos las huellas digitales en el esmalte de los dientes, ya que la predominancia de huellas marcadas en sentido vertical es muestra de un hábito alimenticio más abundante en carne, mientras que la predominancia de

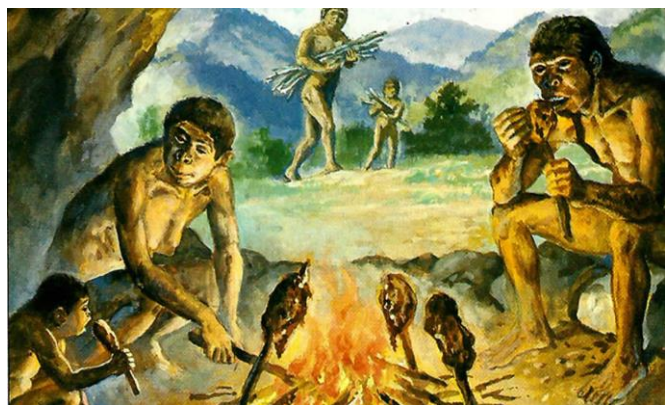
---

<sup>1</sup> MARINO, ALEJO. <https://www.historiando.org/descubrimiento-del-fuego/>. Diciembre, 2018.

<sup>2</sup> IBÁÑEZ, JUAN JOSÉ. "El Origen del Neolítico" en *Investigación y Ciencia*. Noviembre, 2009.

huellas marcadas en sentido horizontal indica un tipo de alimentación más de tipo vegetal. Para afinar aún más la determinación de la dieta otro estudio que llevan a cabo es de tipo químico, la proporción de los diferentes compuestos que aparezcan en sus dentaduras también nos indicarán los tipos de alimentos que consumían. La predominancia de carbono 13 en lugar de carbono 12 indica un mayor consumo de carne, a diferencia de que un porcentaje inferior de estroncio sobre calcio es índice de un consumo mayor de tipo vegetal; también, por ejemplo, un alto porcentaje de nitrógeno 15 indica un frecuente consumo de alimentos lácteos. (Legarre, 2020)<sup>3</sup> En sus inicios el ser humano se alimentaba por instinto, consumía los alimentos tal cual los encontraba: raíces, insectos, frutas silvestres, plantas y carne de todo tipo de animales que pudieran cazar o del carroñeo que consistía en aprovecharse de animales muertos. De estos obtenían todo lo que podían, incluso los sesos y las médulas. Debido a ingerir los alimentos crudos se les desgastaban los dientes hasta tal punto que apenas podían alimentarse, es por este motivo, entre otros, por el que la esperanza media de vida era de dos a tres décadas. A medida que avanzaban los años iban haciendo progresos, por ejemplo, aprendieron a conservar los alimentos en salazones o frutas como higos (Bogado, 2015)<sup>4</sup>

El descubrimiento del fuego se estima por los arqueólogos que ocurriese hace alrededor de 1.6 millones de años, data de hace tanto tiempo que no se sabe a ciencia cierta si fue causa de un rayo o por el choque de dos piedras. Sin embargo, no es hasta hace unos 12.000 años, inicios del Neolítico,



*Ilustración 1. Primeros humanos cocinando con fuego (Gastromakers, 2019)*

cuando el ser humano aprende a conservarlo y recrearlo. En aquella época crear fuego les era muy complicado por lo que ponían especial esfuerzo en mantenerlo e incluso transportarlo en antorchas. Este hito les permitió poder cocinar sus primeros alimentos, sus primeros cocinados consistían en la aplicación directa de la llama sobre las verduras, pescados o carne que previamente habían cazado. Hacia el año

<sup>3</sup> MÓJICA LEGARRE, JOSÉ MANUEL. "La alimentación en la Prehistoria" en *La Alcazaba*. 2020.

<sup>4</sup> BOGADO, SOLEDAD. "La cocina en la Prehistoria" en *No sabes nada*. Septiembre, 2015.

7.000 a.C. la cocina primitiva sufre su primer gran modernización con la invención de vasijas de adobe, en estas ya podían asar, cocer, calentar agua, preparar sopas,...; fue un gran avance debido a que comenzaron a ser comestibles algunas verduras o legumbres que no lo eran simplemente asándolas. Hacia el año 5.000 a.C. aparecen en Egipto los primeros hornos de adobe que permitían asar los alimentos de una forma homogénea debido a sus paredes refractarias añadiendo la ventaja de que evitaban el contacto directo del fuego con el alimento. (Directo al paladar, s.f.)<sup>5</sup>

Durante esta época se produjo una gran extinción de animales debido a la caza masiva, lo que atentaba contra la subsistencia humana. Así que el hombre comenzó a mantener vivos ciertos animales salvajes, después pasó a criar ciertas especies como cabras, ovejas o cerdos. El desarrollo de la ganadería condujo a un aprovechamiento mayor de los animales, ya no obtenían únicamente sus carnes y sus pieles; de estos además obtenían leche, queso y lanas. La ganadería trajo de la mano la agricultura, y estos dos nuevos hábitos adoptados por el ser humano fueron los que hicieron que el ser humano se asentase en poblados y pasasen de ser nómadas a sedentarios. (Método 403, 2019)<sup>6</sup> Estas poblaciones de humanos sedentarios son las que comienzan a preocuparse por mejorar sus viviendas y facilitarse las tareas diarias, diseñando las primeras cocinas domésticas y mejorándolas hasta las que conocemos hoy en día.

## 5.2 COCINA ECONÓMICA

El primer antecedente del origen de las patentes es el Estatuto de Venecia promulgado en 1474, el cual concedía a sus inventores protección jurídica durante 10 años. La primera patente fue dada por la Corona Británica al inglés John Utyman, en 1479, por la creación de un sistema de fabricación de vidrio utilizada por los venecianos y no conocida en Inglaterra, y le concedieron el privilegio de que durase 20 años en lugar de 10 como establecía el estatuto, con la condición de que explicase su sistema de fabricación a los ingleses nativos. La Corona Británica esperaba generar puestos de trabajo y estimular la economía con esta medida, sin embargo, se generaron numerosas protestas por dicho privilegio, lo que conllevó a que en 1623 se procediera

---

<sup>5</sup> Directo al paladar. <https://www.directoalpaladar.com/cultura-gastronomica/historia-del-fuego-en-la-cocina>

<sup>6</sup> Método 403. <https://metodo403.com/cocina-prehistorica>. Abril, 2019.

a la anulación de los privilegios que habían concedido la Corona durante este tiempo y la promulgación del nuevo Estatuto de Monopolios. Este concedía protección jurídica a los inventores durante 14 años, además, se cercioraban de que los inventos fuesen originales de sus inventores y que estos tuviesen una utilidad real. La revolución industrial en 1760 contribuyó a la expansión e internacionalización de las patentes, ya que cada país comenzó a promulgar sus propios estatutos. (Prins, 2016)<sup>7</sup>

La evolución de las cocinas domésticas siempre han ido de la mano de la evolución de las estufas, debido a que los seres humanos aprovechaban el calor que desprendían las estufas para cocinar. La primera patente relacionada con una cocina doméstica fue otorgada al inventor británico John Sibthorpe, en el siglo XVII, la patente consistía prácticamente en una estufa metálica de mayor tamaño del habitual en esa época con una placa de aluminio en su superficie y accesorios para mejorar la comodidad del cocinado. Este invento es conocido como la cocina económica debido a que supuso un gran ahorro económico, ya que mejoró su eficiencia energética, tener concentrado el calor y además conseguir que este se acumule en la placa contribuyó a que se disminuyesen sus pérdidas. Las ventajas que aporta este invento, además de su mejora de eficiencia energética, es que los utensilios ya no se encuentran en contacto directo con el fuego y permite al usuario acercarse con mayor facilidad a realizar las tareas comunes de cocción.

La estructura de estas cocinas era muy sencilla, constaba de un compartimento interior para el combustible, el cual podía ser leña o carbón, al que se podía acceder por la parte frontal o superior; y la placa de aluminio superior que era la que acumulaba el calor. En 1802, George Bodley patentó una versión mejorada, su diseño incluía una placa de hierro forjado en lugar de aluminio que permitía una mayor uniformidad en el calentamiento de la placa; e introdujo vías de escape con la



*Ilustración 2. Cocina económica  
(Maldonadoliceth.blogspot.com, 2016)*

---

<sup>7</sup> PRINS, ARTURO. "Larga y polémica historia de las patentes" en *Criterio Digital*. 2016

finalidad de poder regular el oxígeno necesario en la combustión. Es este prototipo el que dio paso al diseño de la cocina moderna. (DPM especialidades , 2017)<sup>8</sup>

### 5.3 COCINAS DE GAS

Las energías llevan siglos siendo uno de los temas más importantes para los seres humanos, en sus comienzos únicamente la importancia de estas rebundaba en que fuesen capaces de abastecernos para la función que necesitasemos ya fuese de índole térmico, motriz, lumínico, etc. Sin embargo, con el paso del tiempo, necesariamente hemos tenido que ir preocupándonos de diferentes características de estas energías: de su extensión, ya que la mayoría de fuentes de energías son limitadas, como es el caso del petróleo; de su continuidad, casos como la energía eólica o solar que no nos pueden garantizar un continuo uso de ellas; su valor económico, como la energía nuclear que es una energía que requiere de una fuerte inversión; o característica medioambiental, esta ha conseguido mucho peso en los últimos años debido a la degradación y contaminación del planeta. Por lo que es evidente que la energía perfecta tendría que ser ilimitada, limpia, barata y permitirnos poder disponer de ella cuanto y cuando necesitemos. Debido a que dicha energía no existe o no se ha descubierto aún, tratamos de encontrar a cada necesidad la energía que mejor la satisfaga, para ello estudiamos cada caso en función de las características anteriormente mencionadas. Es por esto por lo que se trata de diseñar las máquinas, automóviles o cualquier tipo de sistema tecnológico acorde con una eficiencia energética máxima, ya que el objetivo es conseguir el consumo mínimo de energía que logre hacer funcionar dicha máquina de manera óptima.

Cómo no podía ser de otro modo, el reto energético es una de las cuestiones que más han influido a lo largo de la evolución de las cocinas domésticas. La tala indiscriminada de árboles y la contaminación a causa del carbón hizo que el ser humano se esforzase en encontrar un combustible sustituyente de la leña y el carbón. (Méndez, 2020)<sup>9</sup> En 1802, el inventor alemán Frederick Albert Wilson, demuestra por primera vez en la historia la posibilidad de cocinar con gas. Además, defendía dicho sistema de cocinado porque era más limpio, evitaba el origen de gases contaminantes

---

<sup>8</sup> DPM especialidades. <http://dpmespecialidades.es/historia-de-las-cocinas-de-lena/>. 2017

<sup>9</sup> MÉNDEZ, ELSIE. Sabores de México. <https://lossaboresdemexico.com/y-el-hombre-hizo-a-la-cocina-en-miles-de-anos/> 2020



provenientes de la combustión de leña y carbón; era más rápido, llegaba al calor deseado para cocinar en menos tiempo; su fuerza calorífica era regulable y su precio era más económico. Sin embargo, a raíz de esta demostración comenzaron a surgir nuevos modelos bastante desafortunados ya que debido a sus escapes deficientes originaron múltiples explosiones. Tuvieron que esperar 30 años, hasta 1830, a que saliese en Europa un modelo seguro y práctico, a diferencia de norteamérica que tardaron en llegar hasta 1860. Su aceptación en el mercado fue progresiva debido a que al principio no tuvieron buena prensa y se inculcó en la gente miedo hacia estas, pero con el tiempo lograron ser un éxito. (Martin, 2019)<sup>10</sup>



*Ilustración 3. Cocina de gas  
(Mediamarkt, 2020)*

Las cocinas de gas pueden ser de dos, tres o cuatro quemadores, más adelante se verá como con la aparición de las cocinas eléctricas aparecerán las cocinas mixtas en las que habrá fogones a gas y fogones eléctricos. El funcionamiento de las cocinas de gas es simple, estas constan de un inyector, este es el encargado de adaptar a la cocina el distinto tipo de gas. En el quemador se mezcla el gas con el aire, y al añadir una chispa, mediante una cerilla o encendedor, origina la combustión que hace

que el fogón arda. Posteriormente, se verá, cómo la electricidad mejorará estas cocinas. La introducción de la electricidad en las cocinas de gas consiguió hacer estas más seguras, ya que se introdujeron en ellas un termopar, que es un sensor eléctrico de temperatura, el cual no permite que salga gas si la cocina no está encendida. Fue un gran avance debido a que la mayor problemática de estas cocinas en sus inicios era la inseguridad que daban por la posibilidad de explosiones en caso de escape de gas. Además, la electricidad dio paso a la instalación de un botón eléctrico que originase la chispa, esto facilitó su uso e hizo que fuese más eficiente energéticamente puesto que de esta manera necesita menor cantidad de gas para su encendido; excepto en el caso de que se utilice gas natural, ya que tiene una

---

<sup>10</sup> MARTIN, JAVIER. EcuRed. [https://www.ecured.cu/Cocina\\_de\\_Gas](https://www.ecured.cu/Cocina_de_Gas)

temperatura de ignición superior a la de los otros gases y la chispa no siempre la alcanza. (Quinatoa, 2015)<sup>11</sup>

Existen dos tipos principales de gases por los que se puede optar para abastecer este tipo de cocinas: el Gas Natural y el GLP. El Gas Natural es una mezcla de gases compuesto principalmente por metano (del 75% al 95% de la mezcla), junto con otros componentes como propano, butano, etano, nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, helio y argón. Se forma debido al almacenamiento durante millones de años de la descomposición de materia vegetal y animal en el interior de la superficie de la Tierra. La energía solar almacenada por las plantas forma una fuente de energía fósil liberada por su combustión, esta energía es extraída en yacimientos independientes o junto a yacimientos petrolíferos o de carbón. El Gas Natural es el que tienen la mayoría de usuarios de ciudades, es suministrado por compañías energéticas a través de tuberías, las cuales nos ofrecen unas tarifas por el consumo; y la ventaja de esta es que es ininterrumpido, por mucho que la utilicemos no se acaba. El GLP, también conocido como gas licuado de petróleo, está formado a partir de propano y butano a presión, se condensa esta mezcla de gases para pasarlo a líquido de esta manera ocupa menos volumen y facilita su transporte y distribución. Está formado en torno a un 30% del proceso de refinado de petróleo y en torno a un 70% de la extracción de yacimientos de gas natural o petrolíferos. Tanto el propano como el butano tienen características muy semejantes: son incolores e inodoros, por lo que se les añade un odorizante para poder detectarlos en caso de fuga. Ambos tienen un punto de ebullición bajo y un alto poder calorífico, por eso se emplean como combustibles. Sin embargo, hay que tener precaución con este tipo de gases debido a que son muy volátiles y pueden llegar a ser explosivos; además, la acumulación de estos pueden producir efectos de somnolencia e incluso llegar a tener propiedades de narcotizantes. (Chirinos, s.f.)<sup>12</sup> Por lo tanto, los clientes que no optan a Gas Natural o deciden no hacer la instalación que esta requiere se deciden por el GLP, el cual se puede suministrar de tres formas distintas: envasado, bombonas de butano/propano que la compañía suministradora entrega a domicilio, enfocado a casas que consumen poco gas; canalizado, consiste en un depósito de propano con varias tuberías y

---

<sup>11</sup> URCUANGO QUINATO, DAVID. *“Cocinas a inducción: importancia e impacto en la sociedad ecuatoriana y medio ambiente”*. Marzo, 2015

<sup>12</sup> INGENIEROS CHIRINOS. Butano y propano. <https://www.diferencias.cc/butano-propano/>



contadores en cada casa, muy habitual en urbanizaciones, dicho precio está regulado; o a granel, que consiste en un depósito que abastece a una casa, y su precio está liberalizado. (selectra, 2013)<sup>13</sup>

## 5.4 COCINAS ELÉCTRICAS

La electricidad es un fenómeno físico que se manifiesta debido a la presencia de cargas positivas y negativas en los cuerpos. La materia está formada por átomos que son considerados la unidad fundamental. Estos átomos constan de un núcleo constituido por neutrones y protones, los neutrones carecen de carga eléctrica mientras que los protones tienen carga eléctrica positiva; y alrededor de este núcleo orbitan los electrones que poseen carga eléctrica negativa. Esta explicación no es del todo precisa debido a que como menciona Stephen Hawking en su libro “*Del Big Bang a los agujeros negros*”, publicado en 1988, Murray Gell-Mann descubrió en 1963 los quarks que son bloques de construcción de los protones y neutrones, es decir, son todavía más pequeños que estos. Existen dos tipos de electricidad: la electricidad estática, en esta los electrones permanecen fijos y el resultado de esta es la desigualdad de cargas positivas y negativas; y la electricidad dinámica, en esta los electrones viajan del potencial más bajo al más alto produciendo un flujo de energía, conocido como energía eléctrica. Este flujo de electrones, a su vez, puede ser de dos tipos: corriente continua, si es en una única dirección o corriente alterna, el flujo de electrones cambia de dirección repetidamente. Las características que presenta la electricidad son las siguientes: acumulable, existen dispositivos con la capacidad de almacenarla para posteriormente aprovecharla; y peligrosa, puede alcanzar elevadas temperaturas pudiendo provocar quemaduras o en el peor de los casos la muerte. La energía eléctrica se puede obtener mediante distintos tipos de sistemas: molinos de viento, centrales nucleares, placas fotovoltaicas, centrales hidroeléctricas, centrales térmicas de carbón, centrales térmicas de gas, cogeneración,...; dependiendo del sistema el proceso será más o menos económico y también será más o menos limpio, siendo más limpio el proceso que sea menos perjudicial para el planeta. Y la energía

---

<sup>13</sup> GRUPO SELECTRA. Blog de energía. <https://elblogenergia.com/articles/que-gas-puedo-utilizar-en-mi-casa>. 2013

eléctrica se puede utilizar con fines químicos, térmicos, lumínicos, magnéticos o mecánicos. (Martínez, 2020)<sup>14</sup>

La electricidad al ser un fenómeno físico no es un invento sino un descubrimiento, existe una gran controversia con la asignación de este hallazgo, por lo que se procederá a realizar un breve repaso a la historia que este descubrimiento engloba. Existen teorías especulativas acerca de que el uso de la electricidad para la generación de energía ocurrió hace más de 2000 años debido a que encontraron unas baterías de esta antigüedad, sin embargo, aún no se pudo identificar su uso para esa época. Aproximadamente, en el año 2750 a.C., la civilización dejó unas escrituras cerca del río Nilo haciendo referencia a los peces eléctricos, es decir, una forma de bioelectricidad. En el año 600 a.C., los antiguos griegos descubren que el roce de la lana, la piel u otros objetos ligeros con la piedra ámbar causaba un efecto de atracción. En esta época Thales de Mileto comienza a estudiar dicho fenómeno y concluye que dicha atracción es de tipo magnética y se debe a la fricción del roce de los objetos, sin embargo, estaba errado, puesto que el fenómeno que estaba aconteciendo era la electricidad estática. No obstante, durante mucho tiempo no se dió importancia a la electricidad ya que no se creía que se pudiese sacar provecho de esta y no se consiguieron avances en este hallazgo hasta la revolución científica, en los siglos XVII y XVIII. Previo a esta, a finales del siglo XVI el filósofo y médico William Gilbert realizó un gran estudio y publicó un libro donde diferenciaba el magnetismo de la electricidad, esta publicación fue una gran causa de motivación a que los científicos comenzasen a estudiar acerca de esta energía. En 1752, el científico, político e inventor Benjamin Franklin, llevó a cabo un experimento a partir de una cometa y unas llaves logrando encauzar el poder eléctrico de un rayo, de esta manera demostró que el rayo y las chispas eléctricas tenían la misma naturaleza. Este experimento fue el causante más adelante de su invento el pararrayos. Se produce un gran avance para la electricidad en el año 1800 cuando el físico Alessandro Volta diseña una pila de voltaje capaz de almacenar la energía generada por las reacciones químicas. El físico Hans Christian Oersted, en 1820, descubre accidentalmente que la aguja de una brújula es movida a causa de corriente eléctrica, por lo que tras unos experimentos que llevó a cabo pudo demostrar que la electricidad y el magnetismo estaban

---

<sup>14</sup> MARTÍNEZ, AURORA. La electricidad. <https://conceptodefinicion.de/electricidad/> Enero, 2020

relacionados. El físico y matemático alemán George Ohm, en 1821, define la relación entre corriente, voltaje y resistencia, en la ley de Ohm. En 1831, el físico Michael Faraday, contribuyó enormemente al avance de la ciencia llevando a cabo grandes aportes al electromagnetismo y desarrollando el primer generador eléctrico, el cual permitía enviar corriente eléctrica continuamente. Es en la década de 1860, cuando el físico James Clear Maxwell define las ecuaciones de Maxwell y logra unificar así la electricidad y el magnetismo, abriendo de esta forma el camino a la energía eléctrica, la radio y la televisión. La electricidad no toma importancia en la primera etapa de la revolución industrial, ya que en esta la energía que predominaba era la generada por vapor; sin embargo, en la segunda etapa de la revolución industrial, que ocurre en el siglo XIX, adquiere gran importancia ya que las principales fuentes de energía pasan a ser el petróleo y la electricidad. En 1879, el científico Thomas Alva Edison, logró diseñar la bombilla de filamento, ya existían otros tipos de diseños de bombilla en ese año pero el diseño de Edison era la primera que permanecía durante horas encendida. A finales del siglo XIX, el inventor e ingeniero Tesla inventó el alternador eléctrico para producir corriente alterna; en este momento surgen dos vertientes opuestas: Tesla que apoyaba la corriente alterna, mientras que Edison se mantenía en seguir apoyando la corriente continua. La corriente continua había sido popularizada en Estados Unidos para uso doméstico e industrial, sin embargo, esta era ineficiente puesto que tenía enormes pérdidas en su transporte a grandes distancias, había complicaciones cuando se requería mayores voltajes y desprendía grandes cantidades de calor. Tesla desarrolló más la corriente alterna consiguiendo que esta satisficiera las carencias que presentaba la corriente continua, presentó un sistema que reunía todo lo necesario para la producción y uso de esta: generador, transformador, sistemas de transmisión, motor y luces. En 1888, el empresario George Westinghouse, director de la compañía eléctrica Westinghouse, compró los derechos de patente de la corriente alterna de Tesla y de esta manera se implantó ya que era un tipo de energía más económica y con menor pérdida de energía. (Martínez, 2020)<sup>15</sup>

La primera cocina eléctrica de la historia data de 1906 y fue inventada por Lloyd Groff Copeman, quien inventó además la bandeja flexible para cubitos de hielo y la

---

<sup>15</sup> MARTÍNEZ, AURORA. La electricidad. <https://conceptodefinicion.de/electricidad/> Enero, 2020

tostadora. En sus inicios, no tuvo gran éxito la salida al mercado de estas cocinas ya que la electricidad no estaba aún implantada en todas las casas y además, la poca fiabilidad de los termostatos dejaban cruda la comida o la quemaban. Sin embargo, en 1917, la Westing House Electric Corporation compró la empresa de Copeman y continuo desarrollando y mejorando el invento. Finalmente en 1920 las cocinas eléctricas irrumpieron en el mercado y comenzar a obtener protagonismo. (Mauricio, 2018)<sup>16</sup>

El funcionamiento de esta cocina en sus orígenes consistía en un alambre de nicromo, que es una aleación de níquel y cromo, en forma de espira por la que al pasar corriente, al ofrecer este material gran resistencia, se calienta desprendiendo calor. En la actualidad se sustituye este material por resistencias halógenas. Antiguamente, se ponía la olla o sartén directamente sobre las resistencia, después, apareció la placa vitrocerámica, que es un vidrio conductor de calor que se sitúa entre estas dos. La



*Ilustración 4. Cocina vitrocerámica  
(Electrodomésticos Maher, 2020)*

transferencia de calor que ocurre es en una primera fase de radiación de las resistencias a la placa, en una segunda fase de conducción de la placa a la sartén o cazuela, y en la última fase, de conducción de esta a la comida. (Álvarez, 2016)<sup>17</sup> Las principales ventajas que presentaron este tipo de cocinas frente a las de gas era su fácil limpieza y la posibilidad de aprovechar su calor residual. Sin embargo, el combustible de las cocinas de gas es más económico que la electricidad que consumen estas cocinas y se alcanza más rápido la temperatura deseada también en las cocinas de gas.

<sup>16</sup> MAURICIO, JAVIER. "Lloyd: el hombre que inventó la cocina eléctrica" Octubre, 2018

<sup>17</sup> GARCÍA ÁLVAREZ, JOSÉ ANTONIO. Así funciona la cocina de inducción.

[http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af\\_cocina/af\\_cocina\\_induccion\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_cocina/af_cocina_induccion_1.htm) Febrero, 2016

## 5.5 COCINAS DE INDUCCIÓN

Según la RAE la inducción electromagnética es: *“Producción de electricidad en un conductor por influencia de un campo magnético variable”*. El descubrimiento de este fenómeno físico se le atribuye al físico y químico Michael Faraday en 1831. Como ya se mencionó en el apartado anterior, en 1820 Christian Hans Oersted accidentalmente se percató del movimiento del imán de una brújula a causa de corriente eléctrica, esto le llevó a desarrollar un experimento con el que conseguiría establecer relación entre la electricidad y el magnetismo. Posteriormente, fue André Marie Ampere quien desarrolló la teoría necesaria para entender el experimento de Oersted y otros similares desarrollados por él mismo. Michael Faraday fue convencido por su amigo Richard Philips, editor del Philosophical Magazine, para interesarse en el experimento de Oersted y de esta manera comenzó su investigación. El experimento con el que descubrió la inducción electromagnética Faraday consistía en un anillo de hierro, en una mitad de este anillo enrolló un hilo aislado correctamente y conectado a una batería (lo que conocemos actualmente como el primario) y en la otra mitad del anillo enrolló un segundo hilo conectado a un galvanómetro. Faraday observó, creyendo que el experimento había fracasado, que cuando apagaba la corriente del primario, el galvanómetro detectaba pulso de corriente. Después, también observó que cuando pasaba corriente de manera continua por el primario el galvanómetro no detectaba pulso de corriente; por lo que dedujo en un primer instante que el galvanómetro sólo detectaba corriente cuando se iniciaba o cesaba la corriente en el primario. Faraday continuó investigando acerca de este fenómeno con otro experimento, introdujo un imán en una bobina y observó que producía una corriente transitoria, si en lugar de meterlo lo sacaba, obtenía una corriente transitoria de sentido contrario al obtenido cuando lo introducía. Si el imán permanecía dentro de la bobina no producía corriente, luego era evidente que el imán debía estar moviéndose en relación a la bobina para producir corriente. En la actualidad, se sabe que para producir corriente se necesita una variación en un campo magnético ya sea moviendo un imán, cerrando o abriendo la corriente eléctrica de un solenoide, entre otras formas. Luego, enrollando una bobina a un campo magnético fijo obtenemos una corriente inducida, que es lo que conocemos como un generador eléctrico, el cual transforma energía mecánica en eléctrica. Es evidente el avance científico que supuso dicho descubrimiento, hoy en día se genera energía eléctrica a partir de este

método de diferentes maneras: en una central hidroeléctrica, el agua almacenada en una presa se libera de tal manera que hace girar la bobina de un generador; en una central térmica, el vapor de agua obtenido al calentar agua debido a la combustión de carbón se utiliza para girar bobinas; las centrales eólicas, aprovechan las corrientes de viento para girar bobinas,... (Ureña, 2009)<sup>18</sup> La historia de este descubrimiento fue curiosa, puesto que paralelamente a Faraday, Joseph Henry comunicó que él había descubierto también la inducción electromagnética independientemente de Faraday. Joseph Henry era profesor de matemáticas y filosofía en un instituto de Nueva York por aquella época, por lo que no tuvo el tiempo que requería la investigación que había comenzado en su época vacacional, y en el lapso de ese año Faraday publicó su descubrimiento, siendo por tanto Faraday con justicia el descubridor de la inducción electromagnética. No obstante, el fenómeno que descubrió posteriormente en 1832, fue el de la autoinducción, y además, para consuelo póstumo de Henry lleva su nombre la unidad de inducción eléctrica. (López, 2016)<sup>19</sup>

Por lo general, los métodos de inducción electromagnética están basados en la fórmula:  $\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt}$ , conocida como ley de Faraday en su honor. Esta expresión define que el voltaje inducido en un circuito eléctrico es directamente proporcional a la variación con el tiempo del flujo magnético a través del circuito. Los parámetros que aparecen son los siguientes:  $\varepsilon$  que es la fuerza electromotriz, se mide en voltios y  $\phi_m$  que es el flujo magnético, se mide en weber. La ley indica lo que percibió Faraday en su experimento, la fuerza electromotriz inducida no es proporcional al flujo magnético, sino que es proporcional a la variación del flujo magnético por unidad de tiempo. Y el signo negativo hace referencia al sentido de la fuerza electromotriz definido por el físico Heinrich Friedrich Lenz, y por tanto conocida como ley de Lenz, que enuncia que el sentido de las corrientes, o fuerza electromotriz inducida, siempre se opone a la variación del flujo magnético que la produce. (Ureña, 2009)<sup>20</sup>

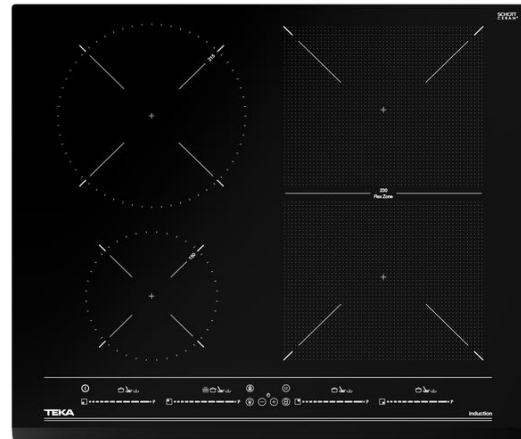
---

<sup>18</sup> GONZÁLEZ UREÑA, ÁNGEL. “La inducción electromagnética” en Investigación y Ciencia. Enero, 2009.

<sup>19</sup> TOMÉ LÓPEZ, CÉSAR. “El descubrimiento de la inducción electromagnética” en Cuaderno de cultura científica. Junio, 2016.

<sup>20</sup> GONZÁLEZ UREÑA, ÁNGEL. “La inducción electromagnética” en Investigación y Ciencia. Enero, 2009.

En 1920, la empresa estadounidense General Motors comienza a estudiar el modo de introducir la inducción en las cocinas domésticas. Sin embargo, no es hasta 1950 cuando esta empresa en una gira por los Estados Unidos hace una demostración que consistía en calentar un cuenco con una placa de inducción, y además, introducía un trozo de papel de periódico entre el cuenco y la placa de



*Ilustración 5. Placa de inducción (Teka, 2020)*

inducción, para demostrar así que la transferencia de calor no era entre la placa y el cuenco como en el resto de cocinas tradicionales, sino que el calor se transfería directamente del cuenco a la comida y por tanto la placa prácticamente no se calentaba. No obstante, este prototipo no llegó a la fase de producción. En 1970, también en Estados Unidos, se realizaron nuevos estudios por el Centro de Investigación y Desarrollo de Westing House Electric Corporation, este estudio fue publicado en 1971 en una exposición en Texas y se fabricaron cientos de unidades para impulsar su entrada en el mercado, el coste de cada cocina era de alrededor 1500\$ (USD). Durante los próximos años se realizaron avances como la resolución de los problemas de sobrecarga que habían sufrido modelos anteriores, la detección de sartenes, la aparición de instrumentos de cocina más económicos para la inducción,... A pesar de ello, la cocina de inducción no logró hacerse un hueco en el mercado estadounidense. Donde sí logró triunfar en el mercado fue en Europa, en 1981, el departamento de I+D+I de la entonces Balay S.A. (ahora BSH) junto con la Escuela Técnica de Ingenieros Industriales de Zaragoza con proyectos dirigidos por el catedrático Armando Roy, iniciaron investigaciones acerca de la introducción de la inducción en las cocinas domésticas. Realizaron un prototipo que probaron calentando un chocolate, tras ser un éxito, la empresa Balay se encargó de la producción y llevarlo al mercado. (Roy, 2013)<sup>21</sup> Pronto adquiriría importancia debido a las ventajas e innovaciones que prestan estas cocinas: su eficiencia y ahorro energético, pues la cocina solamente funciona mientras la sartén se encuentra encima de la placa lo que provoca un gran ahorro energético y además, como el calor se

<sup>21</sup> ROY, ARMANDO. Entrevista en Radio Aragón. Septiembre, 2013.

transfiere directamente de la sartén a la comida apenas tiene pérdidas residuales lo que la hace muy eficiente; su seguridad, al no calentarse apenas la placa hace que esta sea muy segura y fácil de limpiar; su control electrónico, estas placas cuentan con mucha electrónica y permite regular su potencia con gran facilidad, además, obtienen gran temperatura en poco tiempo si es preciso. También presentan alguna desventajas tales como: requieren de una inversión inicial mayor que las vitrocerámicas o las de gas, y que se necesitan material especializado para la inducción.

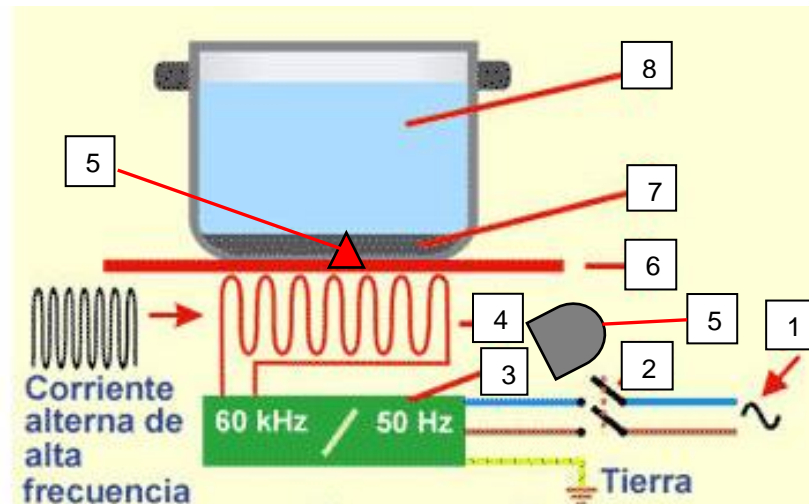


## 6 DESCRIPCIÓN TEÓRICA DEL DISPOSITIVO

El funcionamiento de la cocina de inducción se basa en el fenómeno físico que descubrió Michael Faraday, la inducción electromagnética. Para entender correctamente cómo funciona esta cocina se debe conocer previamente que elementos la componen. El elemento principal por el que está formado es una o más bobinas (dependiendo del número de fogones del que esté compuesta la cocina, tantas bobinas como fogones) de cobre planas y concéntricas, que serán las que actúen de inductor. A estas bobinas se las sitúan en su parte inferior unas pequeñas barras de ferrita, con el objetivo de dirigir las líneas de campo magnético hacia el recipiente en el que vamos a cocinar. Es importante que estas ferritas se sitúen en la parte inferior de las bobinas para evitar que produzcan efecto de imanación con los recipientes, hecho que ocurriría si estas se colocasen en la parte superior de las bobinas. Se encuentra también formado por un circuito electrónico dotado de filtros para eliminar las interferencias en los receptores de radio y televisión que puede producir la alta frecuencia de corriente eléctrica que recorre el enrollado del inductor. Un sensor térmico, llamado NTC, que se situará en el centro de las bobinas inductoras, y se encuentra en contacto con la parte inferior del vidrio, es el encargado de controlar la temperatura del recipiente colocado y sirve como elemento de seguridad, en el caso de que la temperatura pase cierto valor que suele oscilar sobre 300°C. Un amplificador de frecuencia, que aumenta la frecuencia procedente de la red que suele ser de 50-60Hz a valores que oscilan entre los 20-60kHz. Y, por último, un ventilador, necesario para la refrigeración del sistema, el interior de la placa de inducción se ha diseñado de tal modo que facilite dicha refrigeración para ello la bobina es plana y en forma de espira, y dicha espira consta de dos partes compactas separadas por un pequeño hueco entre ellas. Obviamente, a esta cocina se la colocará en su superficie una placa de vidrio cerámico que servirá para colocar los recipientes en ella, para ello tendrá delimitado dónde colocarlos; también tendrá función de proteger el interior de la cocina y en ella se situará el touch control, que es el panel táctil eléctrico con el que se podrá configurar que fogón queremos encender, nivel de temperatura, temporizador,..., y este se sitúa en la zona más próxima al usuario. En el interior de la cocina, las bobinas inductoras se encuentran también protegidas en su parte superior por chapas metálicas para ayudar a la placa de vidrio cerámico a soportar el peso y resistir los golpes. Y debajo de las bobinas se colocan

barras de ferritas en forma radial cuyo cometido es redirrecionar las líneas del campo magnético para canalizar el máximo de campo magnético en sentido ascendente.

A continuación, se adjunta una imagen que ilustra el funcionamiento de una placa de inducción:



*Ilustración 6. Esquema de funcionamiento de una placa de inducción (García Álvarez, José Antonio. Así funciona, 2016)*

1. Red de alimentación, administra una corriente alterna de 230 V a una frecuencia de 50 Hz
2. Interruptor que se opera con el touch control, que permite encender o apagar la placa
3. Amplificador de frecuencia
4. Bobina inductora compuesta por alambre de cobre enrollado en forma de espira
5. NTC, sensor térmico en contacto con la parte inferior de la placa de vidrio cerámico
6. Placa de vidrio cerámico
7. Base ferromagnética del recipiente
8. Agua en recipiente. (Álvarez, Así funciona, 2016)<sup>22</sup>

Su funcionamiento consiste en conectar la bobina, o bobinas inductoras, a una red eléctrica que le suministre una corriente alterna de frecuencia 50-60Hz, la cual será amplificada a valores de 20 a 60kHz, de esta manera esta bobina generará un campo

<sup>22</sup> GARCÍA ÁLVAREZ, JOSÉ ANTONIO. Así funciona.  
[http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af\\_cocina/af\\_cocina\\_induccion\\_3.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_cocina/af_cocina_induccion_3.htm). 2016

magnético que al situar en la placa un recipiente ferromagnético se le inducirá a la base de dicho recipiente una corriente inducida igualmente alterna y de igual frecuencia. La base de este recipiente ferromagnético correspondería al secundario de un transformador, es decir, el inducido. Es evidente, que la base de dicho recipiente no se asemeja a la forma de una bobina y al no tener donde ir esa corriente inducida será la que origine el calor. Por este motivo, no es válido cualquier recipiente para cocinar en una cocina de inducción sino que debe reunir unas características el material del que está compuesto dicho recipiente, tiene que ser de un material ferromagnético que así posea una aceptable conductividad eléctrica y una excelente permeabilidad magnética. La conductividad eléctrica es la capacidad de un material para permitir el paso de la corriente eléctrica a través del mismo, ofreciendo la menor resistencia posible a su paso, es decir, cuanto más conductor es un material menos resistencia ofrece a su paso. La permeabilidad magnética es al magnetismo lo que la conductividad eléctrica a la electricidad, es la relación entre la inducción magnética y la intensidad del campo magnético que la produce.

En el momento que estando la cocina encendida y activado mediante el touch control el fogón, se cierra el circuito magnético y la corriente que pasa por la bobina inductora genera un campo magnético que induce una corriente circular en la base de dicho recipiente ferromagnético, esa corriente se denomina corriente de Foucault. La corriente de Foucault al no tener dónde ir y debido a la resistencia que presenta el material ferromagnético, va a generar una elevada energía en forma de calor por efecto Joule. Este es un fenómeno físico que cita que una parte de la energía cinética de los electrones presentes en una corriente eléctrica circulando a través de un metal se transforma en calor a consecuencia de los choques que se producen entre los mismos electrones y los átomos del metal. Cuanto peor conductor es el material más se calienta. Además, puesto que el material ferromagnético que tienen en la base estos recipientes es mal conductor eléctrico, el propio campo magnético que genera la bobina inductora induce, a su vez, en la parte externa del fondo otro campo magnético que dificultará aún más el paso de corriente y por tanto mejorará la generación de calor. Este campo magnético es un campo magnético alterno, es decir, se magnetiza y se desmagnetiza reiteradamente; debido a estos sus moléculas comenzarán a vibrar, tanto más como alta sea su frecuencia, dicha vibración provocará el choque entre las moléculas que también generará calor. Este fenómeno

es conocido como histéresis magnética, se define como propiedad física que poseen los cuerpos metálicos ferromagnéticos de ofrecer mayor o menor resistencia al cambio de flujo magnético producido por una corriente eléctrica alterna inducida al recorrer el mismo metal. Otro fenómeno que es causante de la generación de calor es el efecto pelicular. Este es un fenómeno eléctrico que ocurre debido a la irregular distribución de la corriente alterna a altas frecuencias, por el cual la distribución de esta tiende a aumentar en la periferia mientras que disminuye en su centro, lo que provoca una mayor resistencia que favorecerá la generación de calor. Cuando la corriente que circula es continua o alterna de frecuencias bajas dicho efecto es nulo o despreciable, sin embargo, en el caso que estamos estudiando ya que la base del material ferromagnético es de mayor sección y la frecuencia de una cocina de inducción puede llegar a los 60 kHz se debe tener en cuenta a la hora de la generación de calor. En resumen, la generación de calor en una cocina de inducción es causa del efecto Joule, las pérdidas por histéresis y el efecto pelicular; siendo el efecto Joule el principal protagonista de dicha generación.

Existen tres tipos de transferencia de calor: radiación, convección y conducción. La radiación es la transferencia de calor por ondas electromagnéticas como la luz visible, el infrarrojo y la radiación ultravioleta. Este tipo de transferencia de calor se daría incluso si sólo hubiese vacío entre el cuerpo que radia calor y el cuerpo que lo recibe, además el cuerpo radiante emite esta energía térmica en todas direcciones por igual. La convección es esa transferencia de calor debido al movimiento de una masa de fluido como puede ser agua, aire, aceite,... Y la transferencia por conducción se da cuando dos cuerpos están en contacto, el cuerpo que posee mayor temperatura le transmite calor al cuerpo que tiene menor temperatura. Es interesante analizar que en las cocinas de inducción las transferencias de calor que se dan son directas, sólo una fase, del recipiente al alimento ya sea por conducción o convección si en la olla esta llena de agua o aceite, esta es una de las razones por las que este tipo de cocinas son tan eficientes. A diferencia de las cocinas vitrocerámicas y las cocinas de gas que al tener más fases de transferencias de calor pierden eficiencia, ya que cuantas más fases existan mayor es la probabilidad de que se vaya disipando el calor hasta llegar al alimento que es el objetivo. En las cocinas vitrocerámicas, por ejemplo, encontramos tres fases de transferencia de calor: primera fase, que es radiación, la resistencia al pasar corriente irradia calor que llega a la placa vitrocerámica; segunda

fase, conducción, la placa vitrocerámica al estar en contacto con la sartén u olla y a mayor temperatura la transfiere calor; y la última fase, que igual que ocurre en todos los tipos de cocina es convección o conducción entre la sartén u olla y el alimento. En el caso de la cocina de gas tenemos dos fases de transferencia de calor: la primera, radiación, la llama de fuego que sale del fogón genera calor en todas las direcciones y es absorbido por la sartén u olla, y la segunda fase, que es la misma que para los dos casos anteriores, conducción o convección, entre la sartén u olla y el alimento. (Young, 2009)<sup>23</sup>

---

<sup>23</sup> YOUNG, H.D., R.A. y FLORES. Física Universitaria. Sears-Zemansky (Vol. 1) Méjico: Pearson Educación. 2009

## 7 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La placa de inducción para funcionar debe estar alimentada por una tensión de corriente alterna, para ello estas se encuentran conectadas a la red de casa, en Europa, por normativa, esta oscila entre 220 y 230 V y una frecuencia de valor entre 50 y 60 Hz. Esta función viene expresada por la siguiente fórmula:

$$U(t) = U_{m\acute{a}x} \cdot \sin (wt)$$

siendo:  $U_{m\acute{a}x}$ , valor máximo de la tensión

$w = 2 \cdot \pi \cdot f$  , donde f es la frecuencia

t, tiempo

La corriente que generará dicha tensión vendrá determinada por la siguiente expresión:

$$I(t) = I_{m\acute{a}x} \cdot \sin(wt - \alpha)$$

siendo:  $I_{m\acute{a}x}$ , valor máximo de la corriente

$w = 2 \cdot \pi \cdot f$  , donde f es la frecuencia

t, tiempo

$\alpha$ , grado de desfase entre tensión y corriente

Esta corriente al pasar por una bobina tiene carácter inductivo y por tanto se va a encontrar retrasada 90° respecto de la tensión. Si por una bobina circula corriente continua esta no ofrecerá ningún tipo de resistencia y actuará como un cortocircuito. Si por el contrario, circula corriente alterna, como es en nuestro caso, la bobina ofrecerá una oposición a este paso de corriente, dicha oposición se conoce como reactancia y viene dada por la siguiente expresión:

$$X_L = w \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

siendo: L, la inductancia, esta mide la oposición a un cambio de corriente, este valor depende de las características físicas del conductor y de la longitud del mismo.

## 7.1 LEY DE FARADAY-LENZ

La inducción electromagnética es el fenómeno principal de funcionamiento de este tipo de placas, Michael Faraday descubrió que un campo magnético variable en el tiempo podía inducir una fuerza electromotriz en un circuito que se encontrase en espacio influenciado por esta variación de campo. Esta fuerza electromotriz origina una corriente inducida que se opone al cambio de flujo, luego la expresión de la f.e.m. vendrá determinada por la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt}$$

Si el circuito al que se va inducir la corriente se trata de una bobina de N espiras, la expresión será:

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

siendo:  $\varphi$ , flujo magnético

t, tiempo

El signo menos de la ecuación de Faraday es explicado por la Ley de Lenz, esta indica que la corriente inducida es tal que se opone a la variación del campo magnético que la ha originado.

El flujo magnético viene determinado por la siguiente expresión:

$$\varphi = B \cdot S \cdot \cos\theta$$

siendo: B, inducción magnética

S, sección atravesada por las líneas de campo magnético

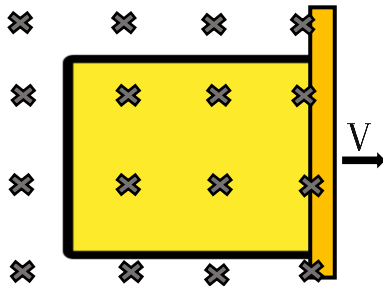
$\theta$ , ángulo que forman la sección y las líneas de campo magnético

Se entiende como S al vector que representa la orientación de la sección y es normal a esta. Atendiendo a la fórmula, se intuye que el flujo será máximo cuando las líneas de campo sean paralelas a la sección y nulo cuando estas sean perpendiculares.

## 7.2 FORMAS DE OBTENER CORRIENTES INDUCIDAS

A partir de las expresiones de flujo magnético y f.e.m., podemos inducir corrientes de tres maneras distintas: variando el tamaño de la superficie atravesada por el campo, haciendo girar la espira inducida o variando el campo magnético. A continuación, se expone qué ocurre en los tres casos:

- Fuerza electromotriz inducida al variar el tamaño de la superficie atravesada por un campo magnético uniforme:



*Ilustración 7. Sección rectangular de lado móvil, atravesada por un campo magnético uniforme*

Se considera una superficie de sección rectangular que es atravesada perpendicularmente por un campo magnético uniforme (sentido entrante al plano), y en el que el lado derecho está en continuo movimiento, en un comienzo desplazándose hacia la derecha y posteriormente retornando hacia la izquierda.

Analíticamente se observa como este proceso genera una fuerza electromotriz inducida, debido a la continua variación de sección:

$$\varepsilon_{inducida} = -\frac{d\phi}{dt} = -B \cdot \frac{dS}{dt} = B \cdot \frac{l \cdot dx}{dt} = -B \cdot l \cdot v$$

siendo: B, inducción magnética

l, lado constante del rectángulo

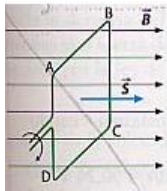
v, velocidad a la que se desplaza el lado móvil de la sección

Como se observa en la expresión, en el momento que el lado móvil de la sección permanezca quieto, su velocidad será cero, haciendo nula la f.e.m. y por tanto no habrá corriente inducida.

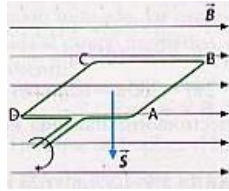


- Fuerza electromotriz inducida al variar la orientación de una espira en un campo magnético uniforme:

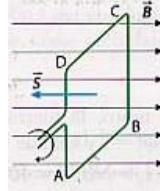
En el seno de un campo magnético uniforme se tiene una espira girando continuamente, este continuo giro va a ir variando el ángulo formado entre la sección y las líneas de campo magnético. Luego se va a producir variación del flujo debido a las distintas orientaciones de la espira.



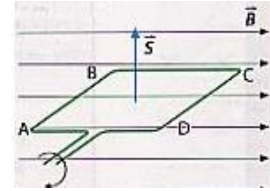
$$\theta = 0^\circ; \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{máx}}$$



$$\theta = 90^\circ; \mathcal{E} = 0$$



$$\theta = 180^\circ; \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{máx}}$$



$$\theta = 270^\circ; \mathcal{E} = 0$$

*Ilustración 8. Movimiento de una espira perpendicular a un campo magnético uniforme. (Leandro Bautista. Fisicanet, 2016)*

Se supone que la espira gira a una velocidad angular constante ( $\omega = \text{cte.}$ ). Luego la expresión de la f.e.m. inducida viene definida:

$$\mathcal{E}_{\text{inducida}} = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d(B \cdot S \cdot \cos(\theta))}{dt} = -\frac{d(B \cdot S \cdot \cos(\omega t))}{dt} = B \cdot S \cdot \sin(\omega t)$$

Luego, la función que determina la f.e.m. inducida en función del tiempo es:

$$\mathcal{E}_{\text{inducida}}(t) = \mathcal{E}_0 \cdot \sin(\omega t)$$

Si se tratase de una bobina de N espiras:

$$\mathcal{E}_{\text{inducida}}(t) = N \cdot \mathcal{E}_0 \cdot \sin(\omega t)$$

Como la corriente es un parámetro proporcional a la f.e.m. la corriente inducida también será de carácter senoidal, es decir, se genera una corriente alterna. Vendrá definida:

$$I_{\text{inducida}}(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t)$$

- Fuerza electromotriz inducida debido a un campo magnético variable:

Se tiene una bobina de N espiras situada perpendicularmente a las líneas de campo magnético, si la corriente que circula por el inductor es una corriente alterna entonces esta generará un campo magnético variable y por tanto una f.e.m. inducida.

$$\mathcal{E}_{inducida} = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} = -N \cdot S \cdot \frac{d(B)}{dt}$$

Esta última manera de conseguir la corriente inducida es nuestro caso a estudio, por la bobina inductora circula una corriente alterna que generará un campo magnético variable, esto inducirá una f.e.m. en la base ferromagnética de nuestro recipiente que dará lugar a la corriente inducida que queremos obtener. Tanto la f.e.m. como la corriente son proporcionales a la rapidez con la que varía el campo, es decir, la frecuencia. Debido a esto, como se explicó en el epígrafe anterior, se sitúa a la entrada de la placa inductora un amplificador de frecuencia que eleva esta desde los 50Hz a valores de entre 20 y 60 kHz. (Bautista, 2016)<sup>24</sup>

### 7.3 LEY DE BIOT-SAVART

La ley de Biot-Savart permite obtener el campo magnético creado por corrientes eléctricas. Si por un hilo conductor circula un número de cargas a una cierta velocidad, será que por este está circulando una corriente que vendrá determinada por la siguiente expresión:

$$I = q \cdot n \cdot v_d \cdot A$$

siendo: q, valor de la carga

n, número de cargas

$v_d$ , velocidad de desplazamiento de las cargas

A, sección del conductor

---

<sup>24</sup> Bautista, Leandro. *Inducción electromagnética* en Fisicanet. 2016

Se puede representar un elemento diferencial de corriente como un elemento diferencial de longitud del conductor con el sentido correspondiente a la circulación de corriente:

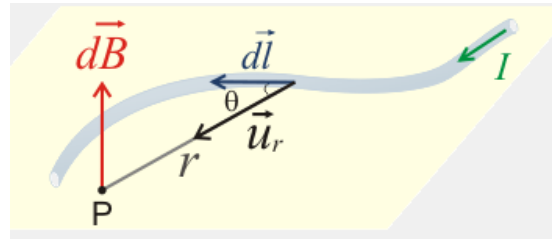


Ilustración 9. Diferencial de campo magnético creado por un diferencial de corriente eléctrica. (Martín Blas, Teresa y Serrano Fernández, Ana. Universidad Politécnica de Madrid)

El campo magnético (B) es una magnitud vectorial, su unidad en el Sistema Internacional es el tesla (T). Un tesla se define como el campo magnético que ejerce una fuerza de un newton sobre una carga de un culombio que se mueve a una velocidad de 1 m/s dentro del campo y perpendicularmente a las líneas de este. Cuando una carga se mueve a una cierta velocidad, como se observa en la ilustración 9, se origina un campo magnético en todo el espacio. Se puede obtener el valor de este para cualquier punto del espacio, si se calculase por ejemplo para el punto P, quedaría la siguiente expresión:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \cdot \vec{v} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

siendo: q, la carga que crea el campo

v, es la velocidad de dicha carga

r, distancia entre la carga y el punto P donde quiero calcular el campo

$u_r$ , vector unitario que va desde la carga hacia el punto P

$\mu_0$ , permeabilidad en el vacío, constante de valor  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m

El sentido del campo magnético vendrá determinado por la regla de la mano derecha. Para obtener el campo magnético creado por un elemento diferencial de corriente es igual al campo magnético creado por una carga en ese punto P multiplicado por todas las cargas que contiene ese diferencial de corriente, la expresión sería la siguiente:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \cdot \vec{v} \times \vec{u}_r}{r^2} \cdot N \cdot A \cdot dl$$

Reagrupando, resultará:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \cdot v \cdot N \cdot A \cdot d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

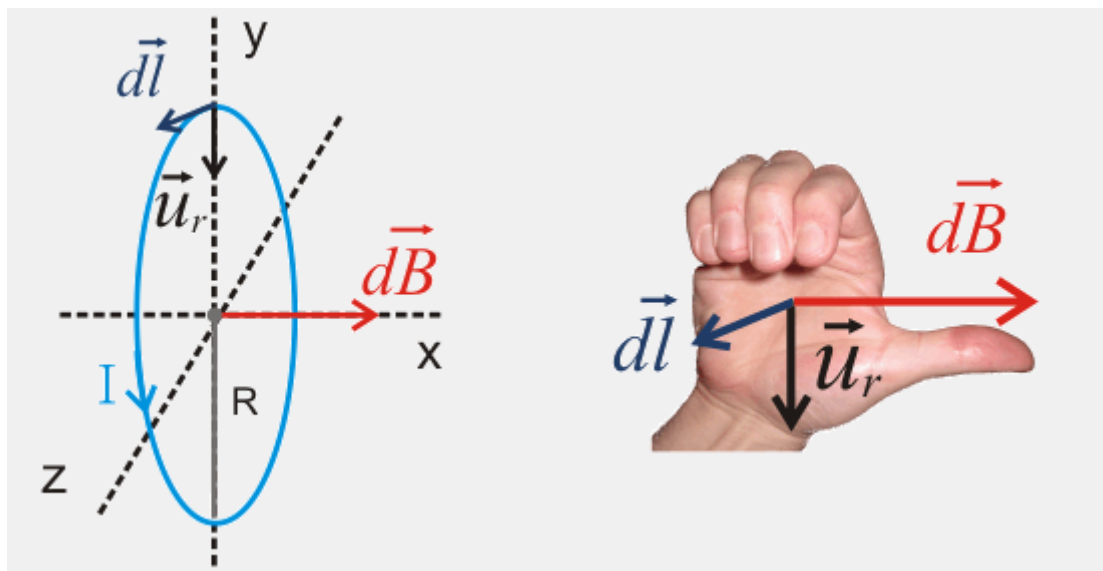
Finalmente, la expresión será:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

Para obtener el campo magnético creado por todo el hilo conductor se debe integrar el diferencial de campo de la expresión anterior para toda la longitud del conductor:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

En nuestro caso el conductor que genera el campo magnético es una bobina y por tanto tiene forma de espira. Se deberá extrapolar el razonamiento anterior para dicha geometría, que no será muy compleja ya que la integral se simplifica por simetría. Para cualquier elemento diferencial de corriente que se tome sobre la espira, el campo que produce en su centro es un vector en la dirección X y de sentido positivo.



*Ilustración 10. Diferencial de campo magnético creado por un diferencial de corriente eléctrica de una bobina. (Martín Blas, Teresa y Serrano Fernández, Ana. Universidad Politécnica de Madrid)*

El módulo del campo dB vendrá determinado por la siguiente expresión:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot dl}{r^2}$$

donde R es el radio de la espira.

El campo total B es la integral de la expresión anterior para los límites Re (radio externo) y Ri (radio interno), ya que nuestra bobina no es completamente compacta. (Blas & Serrano Fernández)<sup>25</sup>

La expresión será:

$$B = \oint_{Ri}^{Re} dB = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot (Re - Ri)^2} \oint dl = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot (Re - Ri)^2} \cdot 2\pi \cdot (Re - Ri)$$

Siendo el resultado final:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot (Re - Ri)}$$

## 7.4 GENERACIÓN DE CALOR

La corriente inducida en la base del recipiente ferromagnético va a ser la causante de la generación de calor. Esta base ferromagnética se asemejaría al secundario de un transformador, con la diferencia de que esta corriente inducida al no tener donde ir se disipará por efecto Joule generando calor. También, aunque en menor medida que el efecto Joule, fenómenos como la histéresis magnética o el efecto pelicular se deberán tener en cuenta.

- Efecto joule:

El efecto Joule es la manifestación térmica de la resistencia eléctrica. Al circular corriente eléctrica por un conductor, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido al choque de los electrones con las moléculas del

---

<sup>25</sup> Martín Blas, Teresa y Serrano Fernández, Ana. *Magnetismo* en Universidad Politécnica de Madrid

conductor por donde circulan. Esta cantidad de energía calorífica es proporcional al cuadrado de la corriente y a la resistencia que propone el conductor a su paso. Su expresión viene definida por la siguiente fórmula:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

Luego, para el funcionamiento de la cocina de inducción, interesa que el material por el que esta hecho el recipiente en el que se inducen las corrientes sea mal conductor eléctrico para ofrecer la mayor resistencia posible. También será importante que la corriente inducida sea alta, es por este motivo que antes de llegar la corriente alterna al inductor se le amplía la frecuencia a valores muy elevados, ya que la frecuencia es proporcional a la f.e.m. inducida y por tanto, también a la corriente inducida. (Planas, 2018)<sup>26</sup>

En una máquina eléctrica estas corrientes inducidas en la base ferromagnética del recipiente corresponden a las corrientes parásitas, y las pérdidas que estas originan son las perdidas de Foucault, que vienen determinadas por la siguiente expresión:

$$P_f = K_f \cdot f^2 \cdot B_{\text{máx}}^2$$

siendo:  $K_f$ , constante de Foucault, viene determinado por el tipo de chapa

$f$ , frecuencia

$B_{\text{máx}}$ , inducción magnética máxima (Departamento de Tecnología Electrónica, 2011)<sup>27</sup>

- Histéresis magnética:

El fenómeno de histéresis magnética ocurre al magnetizar un material ferromagnético, este al cesar el campo magnético que le ha inducido conserva sus propiedades magnéticas. Se puede observar de una forma muy visual este hecho en el siguiente ciclo de histéresis:

---

<sup>26</sup> Planas, Oriol. *Efecto Joule* en Demotor. Noviembre, 2018.

<sup>27</sup> Departamento de Tecnología Electrónica. Magnetismo, Universidad de Vigo. Noviembre, 2011.

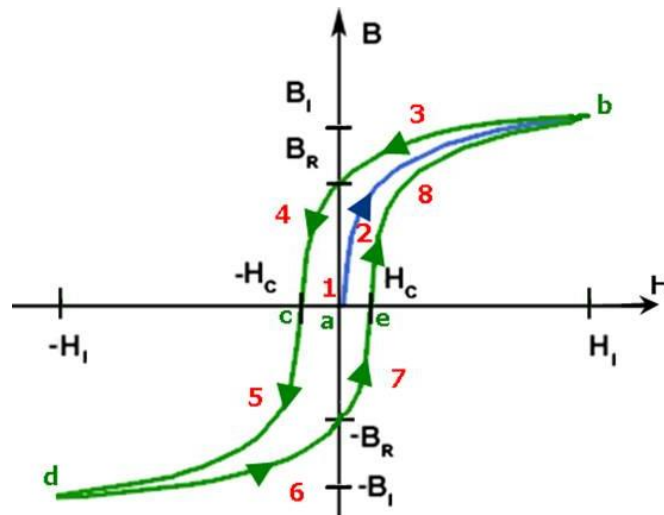


Ilustración 11. Ciclo de histéresis magnética. (Fenómenos magnéticos y electromagnéticos, Ikastaroak.birt.eus)

El material parte de un estado inicial en el que está totalmente desimantado (punto a). A continuación, se le expone al material a un campo magnético progresivo, y este va adquiriendo una densidad de flujo que corresponde a la curva trazada del punto a al punto b de color azul, esta será la curva de imanación del material. Se disminuye H, con lo que B disminuirá también, pero en esta ocasión no retrocede por la misma curva de imanación sino que traza una curva bc. Cuando el campo magnético H se hace nulo, B no será nulo sino que tendrá un valor de inducción remanente ( $B_R$ ). Para anular el valor de inducción magnética B, será necesario aplicar al material un campo magnético de valor inverso denominado campo coercitivo ( $H_C$ ). Este segundo tramo de la curva bc se denomina curva de desimanación. En el tercer cuadrante el comportamiento del material es el mismo, si se le lleva el valor de H hasta  $-H_1$  el valor de B recorre la curva cd hasta adquirir un valor  $-B_1$ . Al volverse a anular el valor de campo magnético, vuelve a adquirir un valor de inducción remanente pero esta vez negativo. Posteriormente, si de nuevo queremos anular el valor de B se tendrá que aplicar nuevamente el valor de campo coercitivo, esta vez positivo ( $H_C$ ). Finalmente, se podrá cerrar el ciclo siguiendo la curva eb. (Fenómenos magnéticos y electromagnéticos)<sup>28</sup>

<sup>28</sup> Fenómenos magnéticos y electromagnéticos. Histéresis magnética.  
[https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/IEA/E/E04/es\\_IEA\\_E04\\_Contenidos/website\\_14\\_histresis\\_magntica\\_curva\\_de\\_histresis.html](https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/IEA/E/E04/es_IEA_E04_Contenidos/website_14_histresis_magntica_curva_de_histresis.html)

Debido a la alta frecuencia de la corriente alterna que fluye por la bobina del inductor genera un campo magnético muy variable, cuanto mayor frecuencia más varía el campo. Esta alternancia de campo provoca un continuo proceso de magnetización y desmagnetización (el ciclo de histéresis explicado anteriormente), y este provoca la disipación de energía en forma de calor. El valor de estas pérdidas coincide el área encerrada por el contorno del ciclo de histéresis, debido a que es un área complejo de cálculo este valor se obtiene a partir de la ecuación de Steinmetz:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{m\acute{a}x}^n$$

siendo:  $K_h$ , constante de histéresis, parámetro que depende del material

$f$ , frecuencia

$B_{m\acute{a}x}$ , inducción máxima

$n$ , constante que toma valores de 1.6 para inducciones inferiores a 1 T y 2 para inducciones superiores (Departamento de Tecnología Electrónica, 2011)<sup>29</sup>

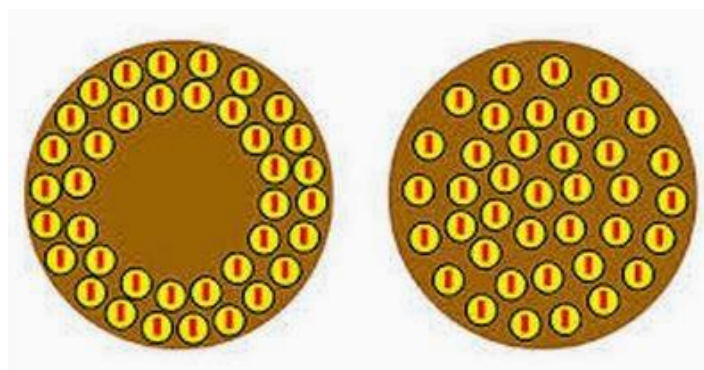
- Efecto pelicular:

El efecto pelicular es un fenómeno que sucede al pasar corriente alterna por un conductor. La densidad de corriente no es uniforme y tiende a acumularse en la periferia del conductor, provocando así una pérdida de la sección efectiva del conductor y por lo tanto, un aumento de las pérdidas, que conllevarán a un aumento en la generación de calor. Este hecho se debe a que la variación del campo magnético es mayor en el centro del conductor dando lugar a una mayor reactancia inductiva en el centro, lo que conlleva a la variación de la distribución de su densidad de corriente. En corriente continua, no aparece este fenómeno, luego su densidad de corriente es uniforme. A continuación, se ilustra dos imágenes comparativas de los dos tipos:

---

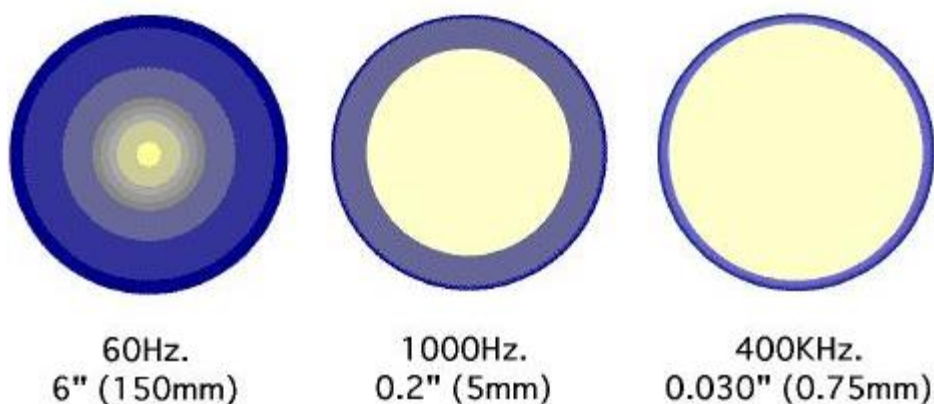
<sup>29</sup> Departamento de Tecnología Electrónica. Magnetismo, Universidad de Vigo. Noviembre, 2011.





*Ilustración 12. Densidad de corriente alterna por un conductor (imagen de la izquierda) y densidad de corriente continua en un conductor (imagen de la derecha). (Factor eléctrico blogspot, 2015)*

El efecto pelicular no es muy notorio para frecuencias bajas o para secciones pequeñas, pero en la placa de inducción se trabaja a elevadas frecuencias y la sección será la base del recipiente ferromagnético, luego será un fenómeno importante a tener en cuenta. Cuanto mayor es el valor de la frecuencia, mayor tendencia tiene la distribución de corriente a acumularse en la periferia, provocando una disminución aún mayor en la sección del conductor con su consiguiente aumento de la resistencia.



*Ilustración 13. Diferentes profundidades superficiales en función de la frecuencia. (Efecto pelicular, EcuRed. Agosto, 2019)*

El área efectiva por el que circula corriente se denomina profundidad superficial y se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{w \cdot \mu \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}}$$

siendo: f, frecuencia

$\mu$ , permeabilidad magnética

$\sigma$ , conductividad del material

Se observa en la fórmula la relación entre la profundidad superficial y la frecuencia.  
(contributors, 2019)<sup>30</sup>

---

<sup>30</sup> EcuRed contributors. *Efecto pelicular*. Agosto, 2019.

## 8 CÁLCULOS

La placa de inducción que se va a simular es un modelo de la empresa TEKA, su nombre es IZC 64630 BK MST. Pertenece a la gama TOTAL que es la gama intermedia, ya que entre sus modelos se puede elegir entre MAESTRO, TOTAL o EASY, en orden de mayor a menor gama. Se trata de un modelo con cinco zonas de cocción, ya que posee cuatro fogones más una función Synchro que permite la unión de dos fogones. Situado en la parte inferior se encuentra un Touch Control Multislíder desde donde se puede regular la temperatura, el temporizador o elegir entre alguna de sus 8 funciones directas como son: parrilla, fritura, plancha, hervir, confitar, fuego lento, derretir y mantener caliente.

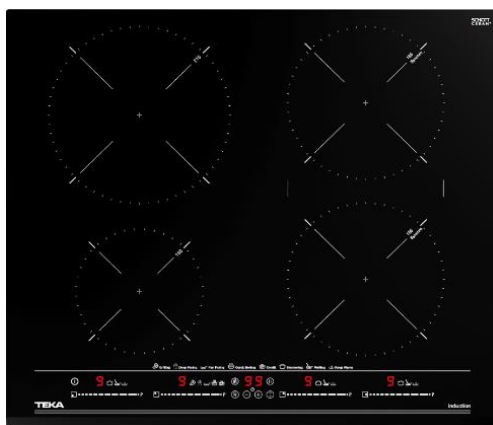


Ilustración 14. Placa IZC 64630 BK MST. (Teka,2020)

A partir de la página oficial de TEKA se obtuvo el dibujo técnico de las dimensiones de la placa:

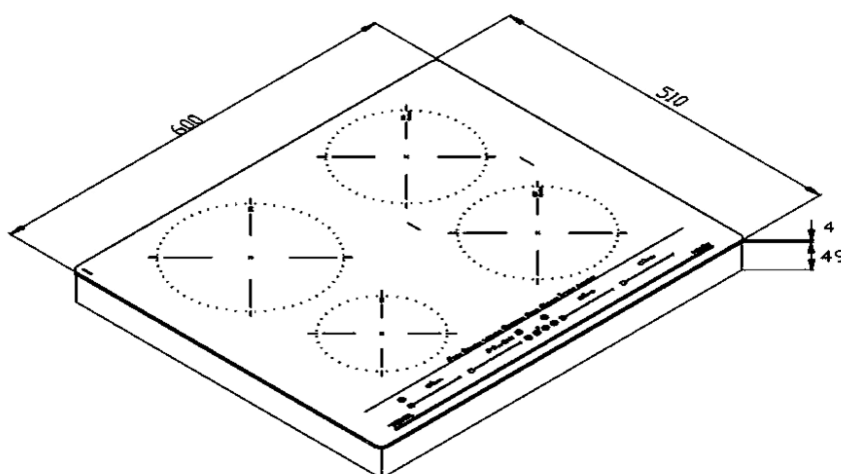


Ilustración 15. Ficha técnica de la placa de inducción (Teka,2020)

Altura del producto (mm): 53                      Anchura del producto (mm): 600

Profundidad del producto (mm): 510      Peso del producto (kg): 10.7

También se obtuvo, a partir de su página oficial, los siguientes datos:

#### Geométricos:

1 placa de  $\varnothing = 150$  mm

1 placa de  $\varnothing = 215$  mm

2 placas de  $\varnothing = 185$  mm

#### Eléctricos:

Potencia máxima fogón ( $\varnothing=150$ ): 1600W      Potencia máxima fogón ( $\varnothing=215$ ): 3000W

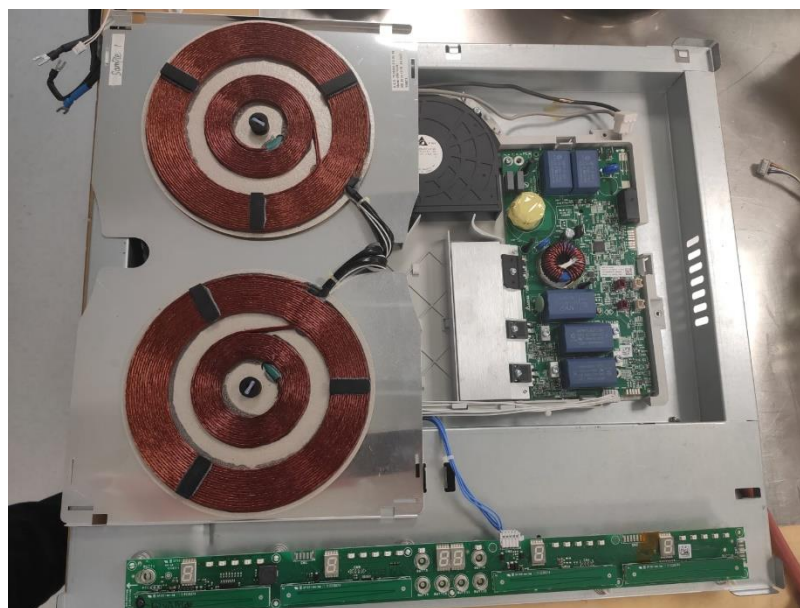
Potencia máxima fogón ( $\varnothing=185$ ): 2100W

#### Conexión eléctrica:

Frecuencia: 50/60 Hz

Tensión de alimentación: 220 - 240 V

La simulación se centró en uno de los fogones de  $\varnothing=185$  mm, y se tuvo que contactar con la empresa TEKA para solicitar algunos datos como: número de espiras de la bobina ( $N=30$  espiras); frecuencia de la corriente de la bobina inductora, este dato puede variar de los 20 a los 60 kHz, sin embargo, su valor usual suele ser 23 kHz; y la corriente que recorre el inductor, que es de 10 A.



*Ilustración 16. Interior de la placa de inducción IZC 64630 BK MST  
(Foto adjuntada por el equipo de I+D de Teka)*

Las dimensiones del conductor de cobre se obtuvieron a partir de una tabla normalizada sacada de internet, se eligió el cable que más se ajustaba acorde a las dimensiones y a los factores eléctricos.

Calibre A.W.G	Diámetro mm	Sección mm <sup>2</sup>	Intensidad en amperios			
			Aire libre		3 conductores en tubo	
			TW	desnudo	TW	asbesto
0000	11.58	107.20	300	370	195	340
000	10.38	85.00	260	320	165	285
00	9.36	67.42	225	275	145	250
0	8.25	53.48	195	235	125	225
2	6.54	33.62	140	175	95	165
4	5.18	21.15	105	130	70	120
6	4.11	13.29	80	100	55	95
8	3.26	8.32	55	70	40	70
10	2.59	5.29	40	55	30	55
12	2.05	3.29	25	40	20	40
14	1.62	2.08	20	30	15	30
16	1.29	1.29	12	16	8	16
18	1.02	0.85	8	12	6	12

Ilustración 17. Tabla normalizada de conductores de cobre. (Unicrom electrónica)

La tensión de alimentación de la placa tiene forma senoidal, tomando como valor eficaz de la tensión 230 V y 50 Hz de frecuencia, quedará la siguiente expresión:

$$U(t) = \sqrt{2} \cdot 230 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t)$$

Sin embargo, esta frecuencia será amplificada a valores que pueden ir desde 20 kHz hasta 60 kHz, luego se hará un cálculo de la inducción magnética para diferentes valores de este rango. El flujo máximo se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$U = 4.44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \varphi_{m\acute{a}x}$$

Despejando en la expresión:

$$\varphi_{m\acute{a}x} = \frac{U}{4.44 \cdot f \cdot N_1}$$

Luego para los diferentes valores de frecuencia se obtendrán los siguientes valores de flujo máximo:

$$f = 20.000Hz \rightarrow \varphi_{m\acute{a}x} = \frac{230}{4.44 \cdot 20000 \cdot 30} = 8.63 \cdot 10^{-5}Wb$$

$$f = 23.000Hz \rightarrow \varphi_{m\acute{a}x} = \frac{230}{4.44 \cdot 23000 \cdot 30} = 7.51 \cdot 10^{-5}Wb$$

$$f = 30.000Hz \rightarrow \varphi_{m\acute{a}x} = \frac{230}{4.44 \cdot 30000 \cdot 30} = 5.75 \cdot 10^{-5}Wb$$

$$f = 40.000Hz \rightarrow \varphi_{m\acute{a}x} = \frac{230}{4.44 \cdot 40000 \cdot 30} = 4.32 \cdot 10^{-5}Wb$$

$$f = 50.000Hz \rightarrow \varphi_{m\acute{a}x} = \frac{230}{4.44 \cdot 50000 \cdot 30} = 3.45 \cdot 10^{-5}Wb$$

$$f = 60.000Hz \rightarrow \varphi_{m\acute{a}x} = \frac{230}{4.44 \cdot 60000 \cdot 30} = 2.88 \cdot 10^{-5}Wb$$

Tras obtenerse los valores de flujo máximo se puede hallar la inducción magnética a partir de la siguiente expresión:

$$B_m = \frac{\varphi_{m\acute{a}x}}{S}$$

Previamente se debe calcular la sección que atraviesan las líneas de campo magnético. Debido a que dichas líneas tienen un recorrido circular cerrado, estas líneas atraviesan la sección de forma longitudinal y transversal. Como se quiere obtener el valor de  $B_{m\acute{a}x}$ , es decir, la inducción magnética máxima, se calcula las dos secciones y se aplica la más restrictiva, la sección de menor valor.

Para observar que regiones de sección atraviesan con mayor intensidad las líneas de campo magnético, se lleva a cabo una simulación 2D en el software Flux.

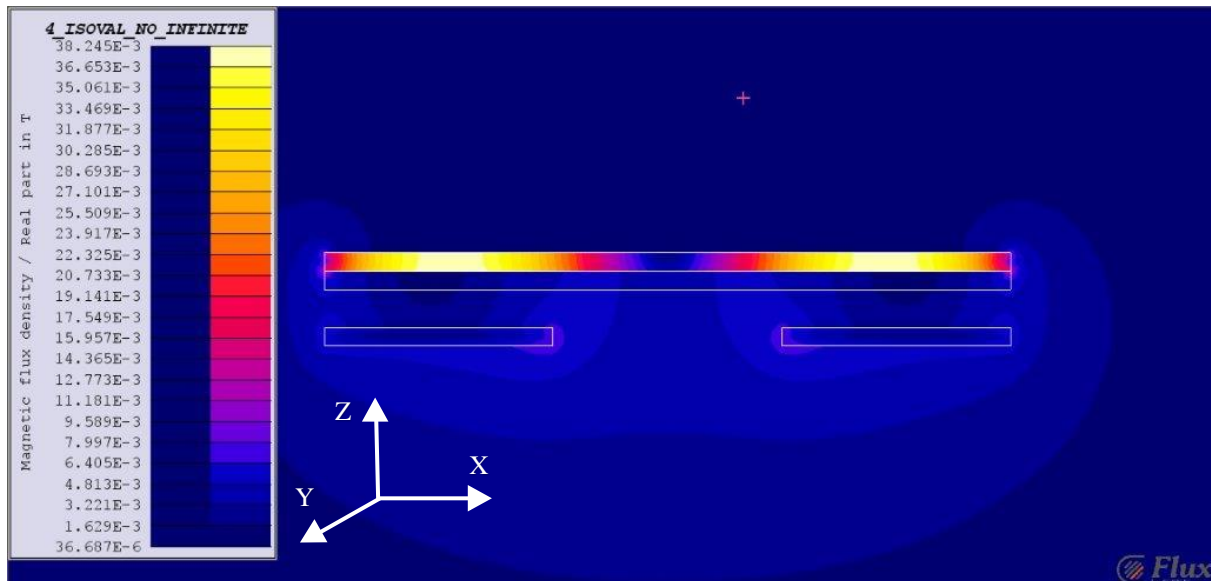


Ilustración 18. Representación de la intensidad de las líneas de campo magnético (Simulación en software Flux)

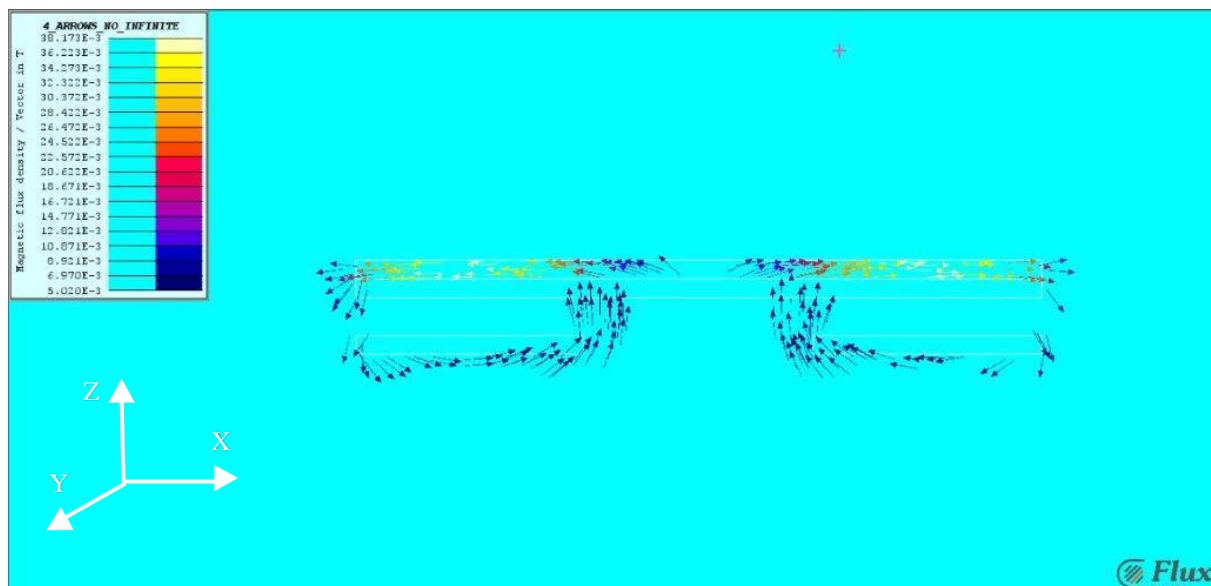


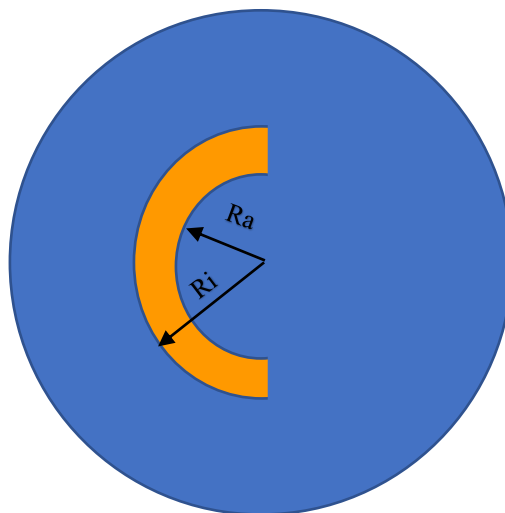
Ilustración 19. Representación de la distribución de las líneas de campo magnético (Simulación en software Flux)

A partir de las imágenes, se puede apreciar que en el sentido del eje z las líneas de campo magnético se acumulan en una region en forma de corona circular ligeramente desplazada hacia el interior del radio interno de la bobina inductora. Este hecho se debe tener en cuenta en el cálculo de la sección longitudinal.

Atendiendo al eje X, la región dónde son más intensas las líneas de campo magnético es en la región en forma de corona circular y de diámetro el valor medio del diámetro externo e interno de la bobina inductora. Este hecho se tendrá en cuenta para el cálculo de la sección transversal.

La bobina inductora en forma de espira, en las imágenes mostradas anteriormente, se observa que se encuentra en el plano ZX, quedando representadas por dos rectángulos situados debajo del cristal vitrocerámico separados por un margen de aire. Estos rectángulos crean un campo magnético entrante al plano y uno saliente, respectivamente, debido a esto el cálculo de la sección se realiza teniendo en cuenta sólo media corona circular.

Para el cálculo de la sección longitudinal, se tiene la siguiente geometría:



*Ilustración 20. Zona de trabajo de las líneas de campo magnético en el eje Z*

Siendo: Ri, radio interno de la bobina

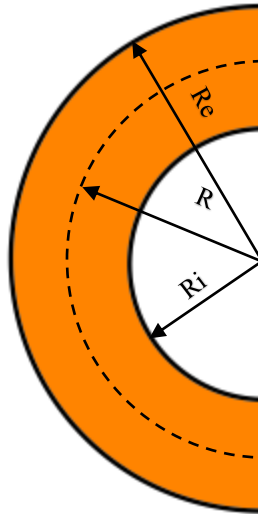
Ra, radio que delimita internamente la zona de trabajo

El disco azul representa la geometría de la base del recipiente ferromagnético, y en naranja se muestra la zona de trabajo de las líneas de campo magnético en el eje Z. Luego la sección de la zona de trabajo es:

$$S_l = \frac{\pi \cdot Ri^2}{2} - \frac{\pi \cdot Ra^2}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot (31^2 - 25^2) = 527.79 \text{ mm}^2 = 527.79 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$



Para el cálculo de la sección transversal, se parte de la siguiente geometría:



*Ilustración 21. Zona de trabajo de las líneas de campo magnético en el eje X*

Siendo:  $R_e$ , radio externo de la bobina inductora

$R_i$ , radio interno de la bobina inductora

$R$ , radio intermedio entre  $R_e$  y  $R_i$

El radio externo es la mitad del diámetro externo:

$$R_e = \frac{\varnothing_e}{2} = \frac{185}{2} = 92.5 \text{ mm}$$

El radio interno se obtiene restandole al radio externo el número de espiras del conductor por el diámetro del conductor:

$$R_i = R_e - N \cdot \varnothing_c = 92.5 - 30 \cdot 2.05 = 31 \text{ mm}$$

Luego el radio intermedio se calcula a partir de la semisuma de estos dos:

$$R = \frac{R_e + R_i}{2} = 61.75 \text{ mm}$$

Finalmente la sección, es un rectángulo de base la longitud del perímetro correspondiente al radio intermedio calculado y altura la profundidad de la base del recipiente ferromagnético:

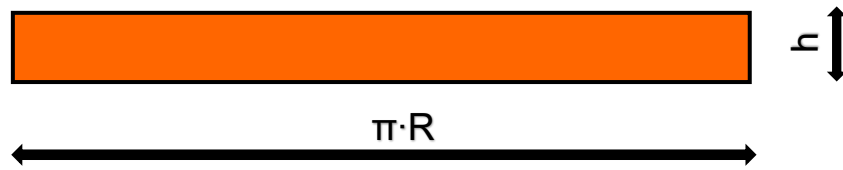


Ilustración 22. Sección transversal que atraviesa las líneas de campo

La sección es:

$$S_t = \pi \cdot R \cdot h = \pi \cdot 61.75 \cdot 5 = 969.96 \text{ mm}^2 = 969.96 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Comparando las dos secciones se observa que la sección longitudinal es menor, y por tanto, más restrictiva que la sección transversal, luego se calcula la inducción magnética utilizando la sección longitudinal.

Se obtienen los valores de inducción magnética para los diferentes valores de frecuencia:

$$f = 20000 \text{ Hz} \rightarrow B_m = \frac{\varphi_{\text{máx}}}{S} = \frac{8.63 \cdot 10^{-5}}{527.79 \cdot 10^{-6}} = 0.163 \text{ T}$$

$$f = 23000 \text{ Hz} \rightarrow B_m = \frac{\varphi_{\text{máx}}}{S} = \frac{7.51 \cdot 10^{-5}}{527.79 \cdot 10^{-6}} = 0.142 \text{ T}$$

$$f = 30000 \text{ Hz} \rightarrow B_m = \frac{\varphi_{\text{máx}}}{S} = \frac{5.75 \cdot 10^{-5}}{527.79 \cdot 10^{-6}} = 0.109 \text{ T}$$

$$f = 40000 \text{ Hz} \rightarrow B_m = \frac{\varphi_{\text{máx}}}{S} = \frac{4.32 \cdot 10^{-5}}{527.79 \cdot 10^{-6}} = 0.082 \text{ T}$$

$$f = 50000 \text{ Hz} \rightarrow B_m = \frac{\varphi_{\text{máx}}}{S} = \frac{3.45 \cdot 10^{-5}}{527.79 \cdot 10^{-6}} = 0.065 \text{ T}$$

$$f = 60000 \text{ Hz} \rightarrow B_m = \frac{\varphi_{\text{máx}}}{S} = \frac{2.88 \cdot 10^{-5}}{527.79 \cdot 10^{-6}} = 0.054 \text{ T}$$

## 9 SIMULACIÓN

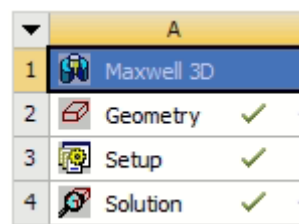
La simulación será desarrollada mediante el software de simulación llamado “Ansys”. Este es un programa que simula el funcionamiento de un sistema a partir de ciertos datos como puede ser geometría, excitaciones, parámetros, etc. Se pueden realizar simulaciones de diferentes tipos tales como: análisis estructural, fluidodinámico, electromagnético, térmico, multifísico, etc.

En este proyecto se va a realizar simulaciones de tipo electromagnético y térmico transitorio, en ese respectivo orden. Estas simulaciones estarán unidas mediante la geometría del sistema y las excitaciones a las que se le somete, por lo que los cambios que realicemos en el sistema se modificarán en los dos tipos de simulaciones.

### 9.1 SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

En esta simulación se trata de obtener los valores de inducción magnética, campo magnético, densidad de corriente y pérdidas ohmicas, así como sus distribuciones en la base del recipiente ferromagnético.

Se comienza la simulación insertando el operador Maxwell 3D:



*Ilustración 23. Operador Maxwell 3D  
(Simulación en software Ansys)*

Se entra en el apartado de geometría, y a continuación se cargará una nueva interfaz de trabajo. Esta estará distribuida a modo de ventanas, una ventana principal que está centrada donde se diseña el sistema; la barra de comandos que se sitúa arriba; dos ventanas en la parte izquierda donde se van a ir generando las carpetas que se vayan creando y donde se muestran las propiedades del material seleccionado; y en la parte inferior, dos ventanas que muestran los mensajes informativos y advertencias sobre la simulación.

En primer lugar se identifica el tipo de problema a tratar (*Maxwell 3D* → *Solution type*), en el caso de este proyecto: *Magnetic* → *Eddy current*. Se trata de un problema electromagnético, en el que se generan corrientes inducidas (Eddy current).

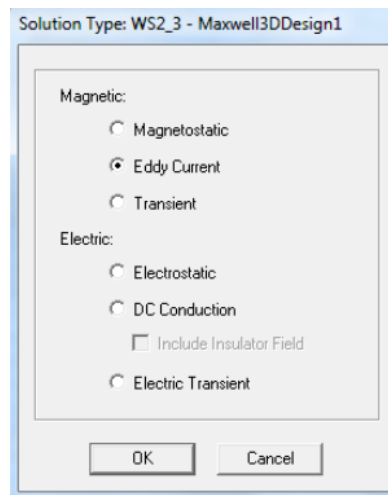


Ilustración 24. Ventana de identificación del problema (simulación en software Ansys)

A continuación, se configuran las unidades con las que se va trabajar en la simulación (*Modeler* → *Units*) y en el caso de este proyecto se trabajará en milímetros.

- DISEÑO DE LA BOBINA:

Se dibuja la bobina que tendrá forma de espira (*Item draw* → *Used defined primitive* → *Segmented Helix* → *Polygon Helix*). Y se definen los siguientes valores para el diseño de esta:

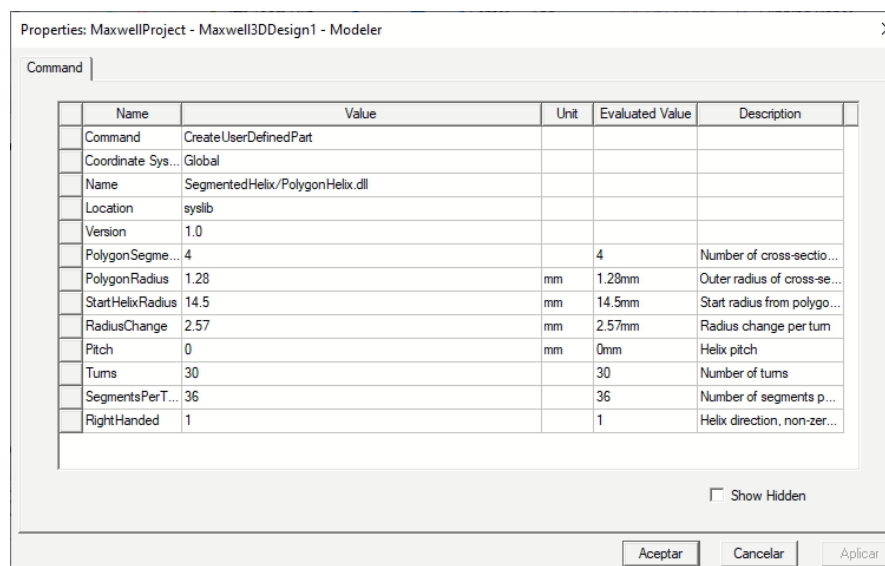


Ilustración 25. Ventana de propiedades de diseño de la bobina (simulación en software Ansys)

Siendo: Turns, número de espiras

Helix pitch, paso de hélice

Start Helix Radius, radio interno de la bobina teniendo en cuenta que la simulación respeta un espacio entre las espiras del conductor

Radius Change, valor doble del Polygon Radius

Polygon Radius, diagonal necesaria para que la sección cuadrangular de la bobina de la simulación equivalga a la sección circular de la bobina real. Se hace el cálculo por el que hemos llegado a dicho valor:

Sabemos que el diámetro real del conductor, atendiendo a la tabla de conductores que se mostró en el apartado de cálculos, de la bobina es  $3.29 \text{ mm}^2$ , la sección del conductor de la bobina de la simulación, puesto que es cuadrada, será:

$$S = l^2$$

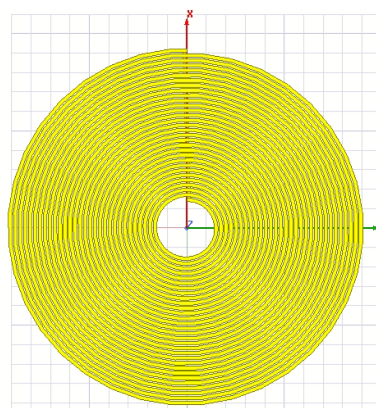
Y el valor de la sección en función de la diagonal, aplicando el teorema de pitágoras será:

$$S = 2 \cdot d^2$$

Despejando la diagonal de la expresión, el valor de Polygon Radius será:

$$d = \sqrt{\frac{S}{2}} = \sqrt{\frac{3.29}{2}} = 1.28 \text{ mm}$$

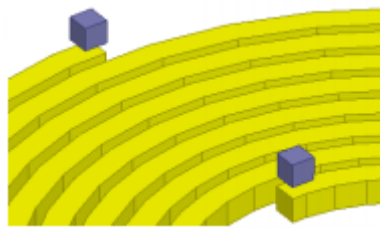
A continuación, se le modifica el nombre del objeto a *Coil*, el color a *yellow* y el material a *copper*. La figura queda tal que:



*Ilustración 26. Bobina inductora  
(Simulación en software Ansys)*

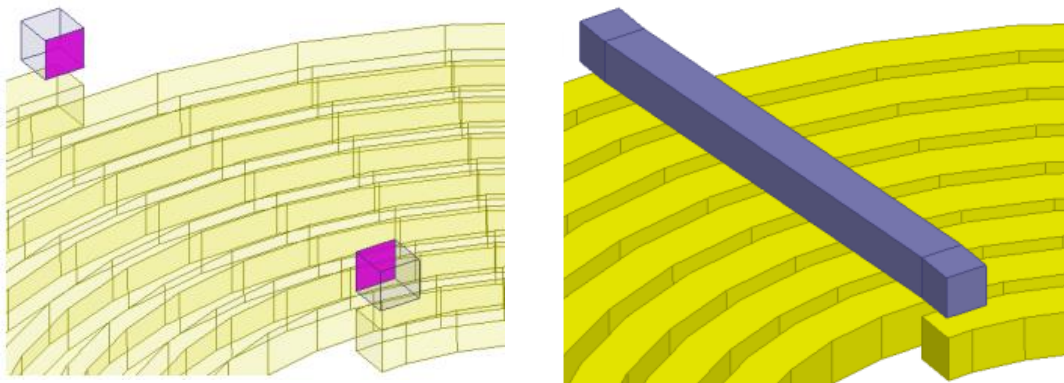
Se necesita que tanto el inicio como el final de la bobina estén conectados entre sí, para ello se diseñará un conductor que los una, el cual irá por encima de esta sin estar en contacto directo con el resto de espiras. Para ello, se procede de la siguiente manera:

En primer lugar, se crea un cubo de dimensiones igual que la sección del conductor (*Draw* → *Box*). Este se situará encima del inicio de la bobina, sin estar en contacto con ella, colocando primero su esquina principal mediante coordenadas absolutas ( $x=13.5$ ;  $y=0$ ;  $z=2.66$ ), y la esquina opuesta utilizando coordenadas relativas ( $dx=1.83$ ;  $dy=1.83$ ;  $dz=-1.83$ ). Después, siguiendo el mismo procedimiento, se generará un cubo de igual dimensiones, encima del final de la bobina, también sin estar en contacto. La esquina principal de este cubo, en coordenadas absolutas ( $x=92.74$ ;  $y=0$ ;  $z=2.66$ ) y la esquina opuesta, en coordenadas relativas ( $dx=1.83$ ;  $dy=-1.83$ ;  $dz=-1.83$ ).



*Ilustración 27. Cajas situadas encima del inicio y final de la bobina (Introduction to Ansys Maxwell, Eddy current analysis)*

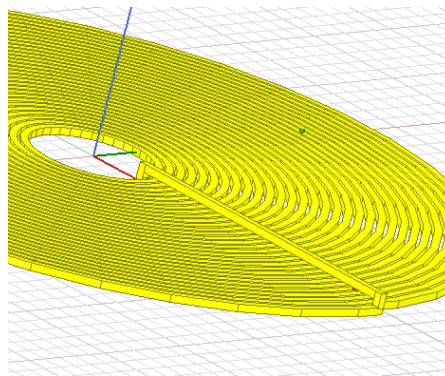
Una vez realizada dichas cajas, se deberán unir. Para conectar estas, (*Edit* → *Select* → *Faces*) seleccionamos las paredes más próximas entre ellas y se ejecuta los comandos para que se unan (*Modeler* → *Surface* → *Create object from face*).



*Ilustración 28. Generación del conductor que une los terminales de la bobina (Introduction to Ansys Maxwell, Eddy current analysis)*

En la imagen, se puede apreciar la importancia de haber generado anteriormente las cajas sin estar en contacto con la bobina, ya que de no haber sido así el conductor creado cortocircuitaría todas las espiras. En el siguiente paso, se duplican ambas cajas (*Edit → Duplicate → Along line*), y se sitúan donde se quieren colocar, en nuestro caso, se quiere que estas cajas unan la bobina con los extremos del conductor superior. Y las situamos siguiendo la estructura anterior, la esquina principal de la caja utilizando coordenadas absolutas ( $x=0$ ;  $y=0$ ;  $z=0$ ) y el vértice opuesto utilizando coordenadas relativas ( $dx=0$ ;  $dy=0$ ;  $dz=-1.83$ ). Se tendrá que indicar el número total de cajas, que será 2.

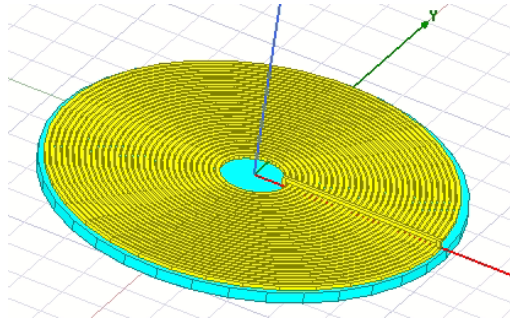
Con el objetivo de que la bobina forme un único cuerpo se deberán ejecutar los siguientes comandos: se selecciona los objetos (*Edit → Select → Objects*), se selecciona todo (*Edit → Select all*) y se une (*Modeler → Boolean → Unite*)



*Ilustración 29. Bobina inductora con conductor que une los terminales incorporado (Simulación en software Ansys)*

- DISEÑO DEL DISCO (Cristal vitrocerámico):

Se crea un cilindro de espesor 5 mm que simule el cristal vitrocerámico que separa la bobina del recipiente en el que se va a cocinar, y se situará en la parte superior de la bobina. Para generar este, se ejecutan los comandos necesarios para crear un círculo (*Draw → Regular Polyhedron*), se introduce en coordenadas absolutas el centro ( $x=0$ ;  $y=0$ ;  $z=-1.3$ ) y después, en coordenadas relativas, el radio y su altura ( $dx=93.9$ ;  $dy=0$ ;  $dz=1.3$ ). Posteriormente, se le indica el número de segmentos por el que esté formado la figura; el material, glass, no se tiene constancia del material exacto por el que está compuesto y se consideró que este sería el más similar; y el color que es azul (*Segments=36, Glass, Blue*).

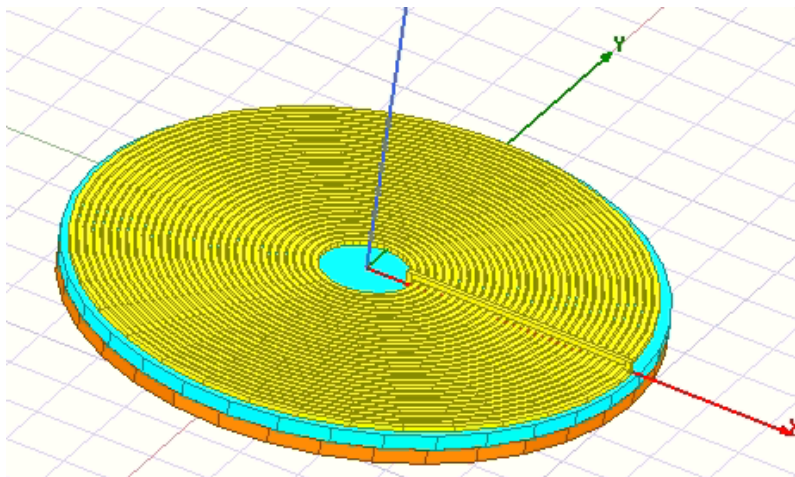


*Ilustración 30. Cristal vitrocerámico apoyado sobre bobina inductora (Simulación en software Ansys)*

Para una mejor visibilidad, la imagen se encuentra invertida, debido a esto se ve el disco situado debajo de la bobina.

- DISEÑO DEL DISCO (base del recipiente ferromagnético):

Se crea un disco que simule la base del recipiente ferromagnético de espesor 5 mm y se sitúa en la parte superior del cristal vitrocerámico. Igual que en el apartado anterior, se ejecutan los comandos para crear un círculo (*Draw → Regular Polyhedron*). Se introduce en coordenadas absolutas el centro ( $x=0$ ;  $y=0$ ;  $z=-6.3$ ) y en coordenadas relativas, dimensiones del radio y altura ( $dx=93.9$ ;  $dy=0$ ;  $dz=-1$ ). Se le asignará de material hierro (*Cast iron*) y de color naranja (*orange*).



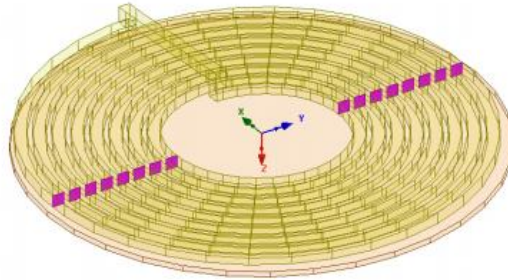
*Ilustración 31. Base del recipiente ferromagnético apoyado en cristal vitrocerámico (Simulación en software Ansys)*

De nuevo, la imagen se encuentra invertida para una mejor visibilidad de la figura.



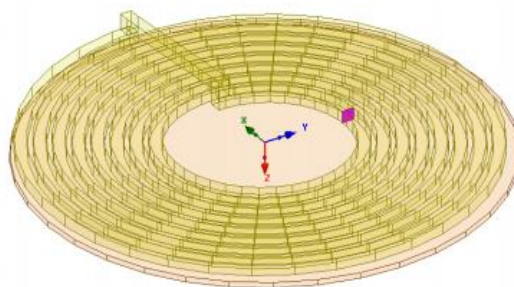
- EXCITACIONES:

Se crea el terminal de la bobina, para ello se selecciona el elemento bobina de la ventana del historial y se ejecutan los comandos pertinentes (*Modeler* → *Surface* → *Section*), y se selecciona el plano YZ.



*Ilustración 32. Plano donde se encuentran los terminales de la bobina inductora (Introduction to Ansys Maxwell, Eddy current analysis)*

Se le cambia el nombre del objeto formado a terminal de la bobina (*Coil Terminal*). Y a continuación, se procede a eliminar todas las entradas excepto la que es de interés para el proyecto, que será donde comienza la bobina. Se selecciona del historial el objeto formado (*Coil Terminal*), se ejecutan los comandos necesarios (*Modeler* → *Boolean* → *Separate Bodies*) y se elimina del historial todos los elementos, excepto el elemento que se buscaba obtener (*Coil Terminal*).



*Ilustración 33. Terminal de entrada de la bobina inductora (Simulación en software Ansys)*

Una vez generado la entrada de la bobina se le asignan las excitaciones pertinentes (*Maxwell 3D* → *Excitations* → *Assign* → *Current*), en la ventana de la excitación se deberá asignar el nombre, valor de corriente y tipo de elemento (*I Coil, 15 A, Solid*).

- SKIN DEPTH:

El Skin Depth es la profundidad necesaria a estudio en la base del recipiente ferromagnético, cómo se concentra la densidad de la corriente alterna inducida a través de la base del recipiente. Este parámetro es función de la frecuencia, conductividad eléctrica, permeabilidad relativa y permeabilidad de vacío. Se obtendrá el Skin Depth adecuado para cada tipo de frecuencia, ya que este valor influirá en el mallado, y este valor se define de la siguiente manera:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{w \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}}$$

$$\delta (f = 20 \text{ kHz}) = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot 20000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1500 \cdot 9.93 \cdot 10^6}} = 0.029 \text{ mm}$$

$$\delta (f = 23 \text{ kHz}) = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot 23000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1500 \cdot 9.93 \cdot 10^6}} = 0.027 \text{ mm}$$

$$\delta (f = 30 \text{ kHz}) = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot 30000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1500 \cdot 9.93 \cdot 10^6}} = 0.024 \text{ mm}$$

$$\delta (f = 40 \text{ kHz}) = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot 40000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1500 \cdot 9.93 \cdot 10^6}} = 0.021 \text{ mm}$$

$$\delta (f = 50 \text{ kHz}) = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot 50000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1500 \cdot 9.93 \cdot 10^6}} = 0.018 \text{ mm}$$

$$\delta (f = 60 \text{ kHz}) = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot 60000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1500 \cdot 9.93 \cdot 10^6}} = 0.017 \text{ mm}$$

Para generar ese mallado fino en la zona que queremos, se generan las 2 caras a partir de la base del recipiente a unas distancias  $\delta$  y  $\frac{\delta}{2}$ , de acuerdo a los valores obtenidos en el Skin Depth, luego se realizará un mallado distinto para las distintas frecuencias. Para realizarlo en el programa, suponiendo para el caso de 20 kHz de frecuencia, se debe seleccionar la cara del disco más próxima al cristal vitrocerámico (*Edit → Select → Faces*), ejecutar los comandos para crear un objeto a partir de dicha cara (*Modeler → Surface → Create Objects from face*) y situarlo donde se desea, desde la base del disco que representa el recipiente, a una distancia  $\frac{\delta}{2}$ . El siguiente paso va a ser duplicar esta capa. Se selecciona la figura creada en el historial de elementos y se ejecutan los comandos para duplicarla (*Edit → Duplicate → Along line*). Esta figura duplicada se situará introduciendo las coordenadas de la primera cara, en coordenadas absolutas ( $x=0$ ;  $y=0$ ;  $z=0$ ) y las coordenadas de la segunda cara en relativas ( $dx=0$ ;  $dy=0$ ;  $dz=-0.029$ ).

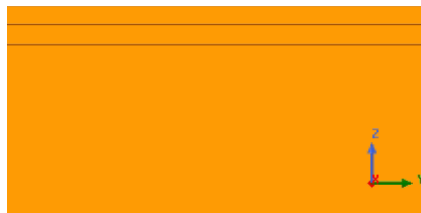


Ilustración 34. Skin Depth (Simulación en software Ansys)

- CREACIÓN DE LA REGIÓN:

Se deberá generar una región para delimitar el espacio de trabajo, esta estará formada por vacío, el vacío representa la ausencia de material en dicho espacio. Se ejecutarán los comandos para desarrollar un cilindro (*Draw → Regular Polyhedron*),

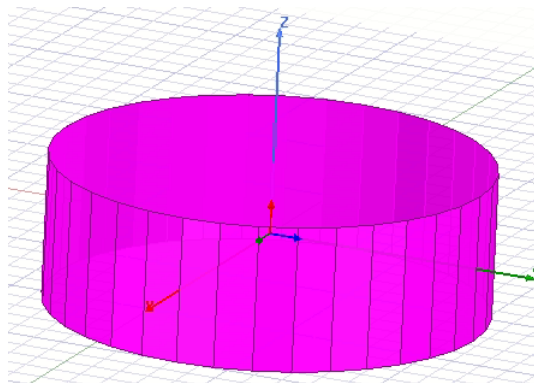


Ilustración 35. Región (Simulación en software Ansys)

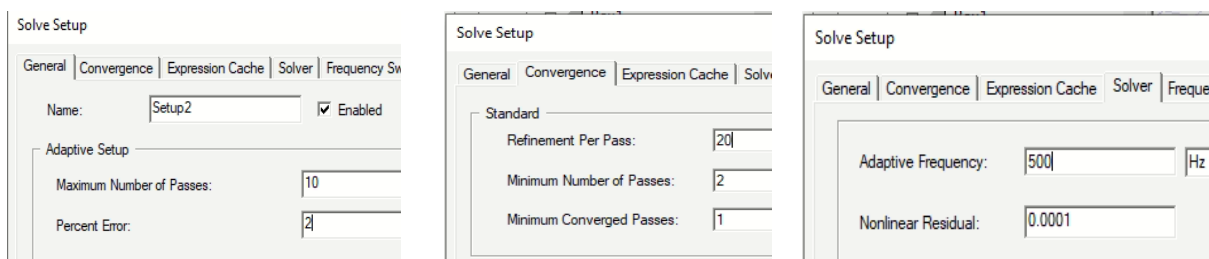
se introducirá primero las coordenadas del centro de la base ( $x=0$ ;  $y=0$ ;  $z=-50$ ) y después, en coordenadas relativas, se le dará volumen al cilindro ( $dx=150$ ;  $dy=0$ ;  $dz=100$ ). Se deberá indicar el número de segmentos (36), se cambiará el nombre a Region y se deberá activar mediante un tic el Display Wireframe.

- GENERACIÓN DE CORRIENTES:

Para generar las corrientes que induce la bobina en la base del recipiente ferromagnético (*Maxwell 3D* → *Excitations* → *Set Eddy Effects*). Sólo interesan las corrientes inducidas en la base del recipiente por lo que se desactivarán las de la bobina.

- ANÁLISIS:

Se ejecutan los comandos necesarios para el análisis (*Maxwell 3D* → *Analyses Setup* → *Add Solution Setup*). En la ventana que se abre, se deberán introducir tres valores: el porcentaje de error, el refinamiento por paso y la frecuencia adaptiva. Siendo: el porcentaje de error, el error que se está dispuesto a asumir; el refinamiento por paso, un parámetro de la convergencia de resolución del programa y la frecuencia adaptiva, la frecuencia de simulación del programa.



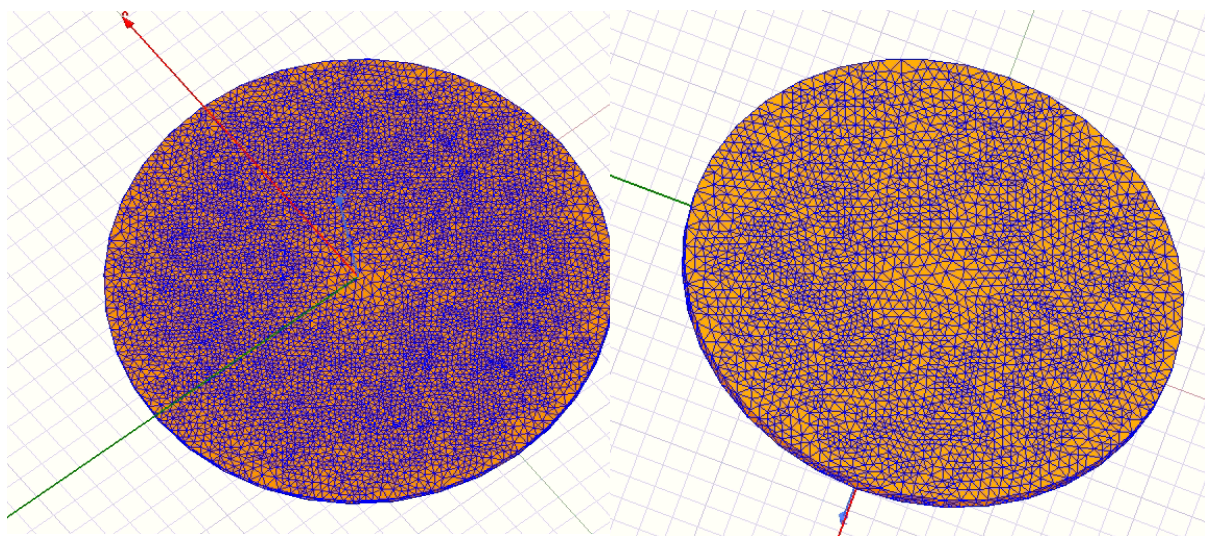
*Ilustración 36. Parámetros necesarios para el análisis (Simulación en software Ansys)*

Y se inicia el proceso de análisis (*RMB on Setup 1* → *Analyze*)

- CREACIÓN DEL MALLADO:

Se genera un mallado en el disco que simula la base del recipiente ferromagnético, se selecciona en la ventana del historial dicho elemento y se ejecutan los

comandos pertinentes (Maxwell 3D → Fields → Plot Mesh). El mallado variará para las distintas frecuencias, ya que el Skin Depth calculado será distinto.

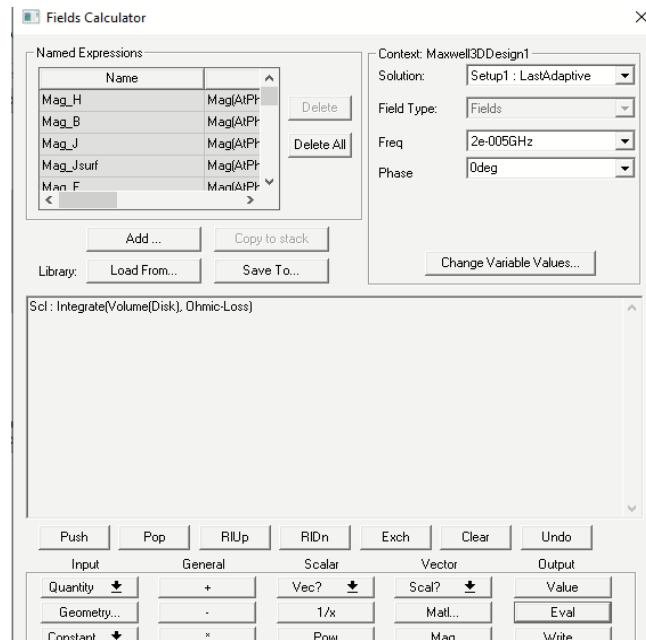


*Ilustración 37. Mallado de la cara más próxima a la bobina inductora (izquierda) y de la cara más alejada (derecha) (Simulación en software Ansys)*

Se observa en la imagen que el mallado en la cara más próxima de la bobina inductora es más preciso que en la cara más alejada, esto es así puesto que se quiere conseguir un mayor grado de precisión en dicha cara.

- CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS:

Se obtendrán las pérdidas (*Maxwell 3D → Fields → Calculator*). Se abrirá una ventana de operaciones y se deberá de introducir las siguientes fórmulas: *Input > Quantity > Ohmic Loss*; *Input > Geometry; Volume; Disk* y se pulsa OK. Después, habrá que introducir: *Scalar > Integrate* y *Output > Eval*.



*Ilustración 38. Operador, cálculo de las pérdidas magnéticas (Simulación en software Ansys)*

La solución que se obtiene para una frecuencia de 23 kHz es:

```
Scl: 181.418868397149
Scl: Integrate(Volume(Disk), Ohmic-Loss)
```

*Ilustración 39. Valor de las pérdidas para 23 kHz (Simulación en software Ansys)*

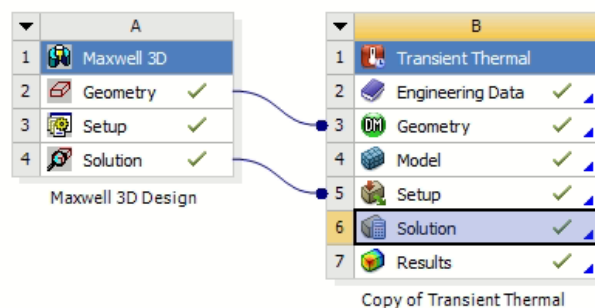
Por último, se tendrán que mostrar las distribuciones de los parámetros que se desean obtener y comentar los resultados obtenidos, esto se realizará en el capítulo siguiente (capítulo 10).

## 9.2 SIMULACIÓN TÉRMICA TRANSITORIA

Se realiza una simulación térmica transitoria del sistema, el objetivo es observar las temperaturas que alcanza la base del recipiente ferromagnético para las distintas frecuencias que se le asigna al inductor en un tiempo determinado. Las cocinas de inducción alcanzan la temperatura deseada pasado un tiempo, no es inmediato, por este motivo el estudio realizado será de tipo transitorio. La regulación de la temperatura se puede realizar variando la frecuencia o la corriente, aumentar la corriente puede ocasionar problemas debido a un excesivo calentamiento del conductor de la bobina inductora por lo que se opta por regular la temperatura a partir

de la frecuencia. Mediante dispositivos electrónicos se aumenta dicho parámetro hasta alcanzar la temperatura deseada, y una vez obtenida esta, se va modificando los valores de frecuencia para mantener la temperatura que se busca.

Para la realización de dicha simulación, se deberá introducir al proyecto el análisis térmico transitorio, y llevar la geometría y los resultados de la simulación de Maxwell 3D, obtenidos previamente, a este nuevo análisis. Esto permite agilizar el proyecto puesto que de esta manera no hay que generar de nuevo la geometría, y los parámetros que se modifiquen en la simulación electromagnética actualizarán los resultados que utiliza la simulación térmica.



*Ilustración 40. Operador de simulador térmico transitorio (Simulación en software Ansys)*

Se entra a la sección llamada *Engineering Data*, y se introduce los materiales con los que se va a trabajar.

Outline of Schematic B2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Source
2	Material			
3	Air			Thermal_Materials.xml
4	Copper			Thermal_Materials.xml
5	Glass			Thermal_Materials.xml
6	Iron			Thermal_Materials.xml
*	Click here to add a new material			

*Ilustración 41. Lista de materiales en Engineering Data (Simulación en software Ansys)*

Dentro de esta sección, situado en la parte inferior se encuentra una ventana en la que se pueden modificar las propiedades de cada material.



Properties of Outline Row 6: Iron				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7870	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Thermal Conductivity	79	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	
5	Specific Heat, C <sub>p</sub>	447	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	

Ilustración 42. Lista de propiedades del hierro (Simulación en software Ansys)

En el siguiente paso, desde la ventana principal (*Workbench 3D*) se actualiza la geometría (*Refresh*) y se entra en ese apartado, también conocido como *Design Modeler*. Se ejecuta los comandos para generarla (*Generate*), se establece el aire como fluido, y se procede a eliminar el aire del lugar que ocupan los objetos de la simulación (*Create* → *Boolean* → *Operation* → *Subtract*). Después, se unen los elementos en un mismo entorno, para ello se seleccionan todos los elementos del historial y se ejecuta el comando pertinente (*Form New Part*). Con el propósito de que el programa pesase menos y funcionara de una forma más eficiente, se elimina la bobina inductora y las ferritas. Luego, quedando activos la base del recipiente ferromagnético, el cristal vitrocerámico y la región, puesto que estos elementos son los que actúan en esta parte de la simulación.

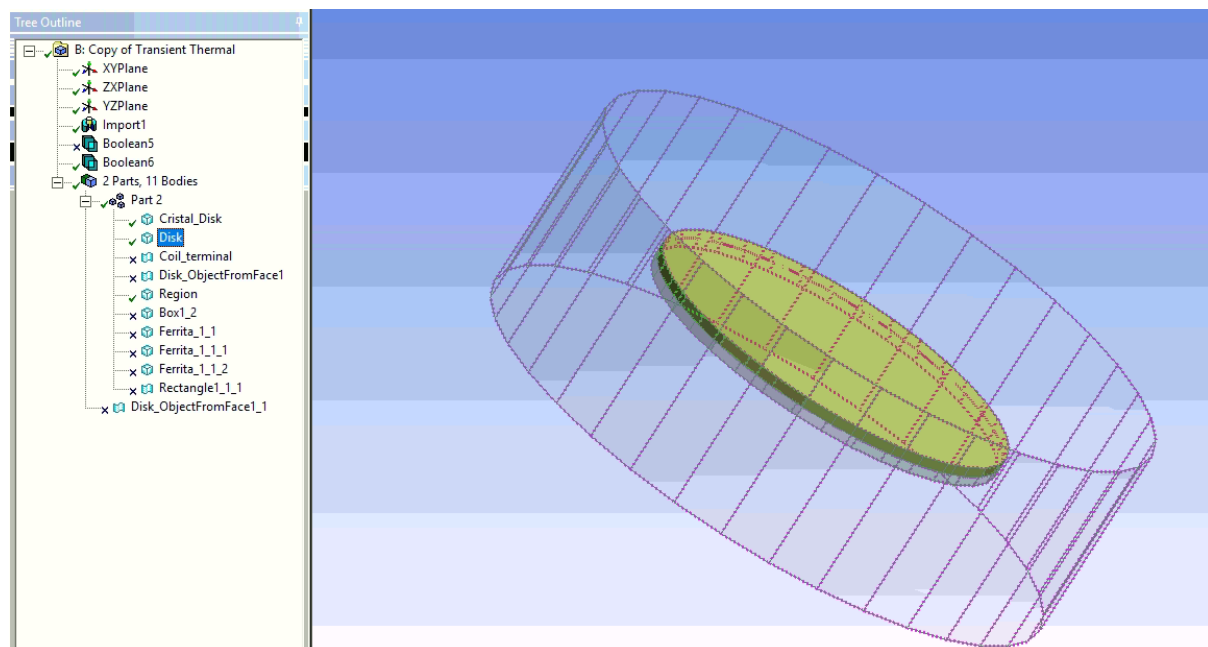


Ilustración 43. Geometría vista desde el Design Modeler (Simulación en software Ansys)



Posteriormente, se pasa al siguiente apartado y se trabaja en el *Set Up*. En este momento, con el mismo propósito que anteriormente, que el programa pese menos para que su funcionamiento sea más óptimo, se simplifica aún más la geometría. Se desactivan la región y el cristal vitrocerámico, pues sólo se trabaja con la base del recipiente ferromagnético.

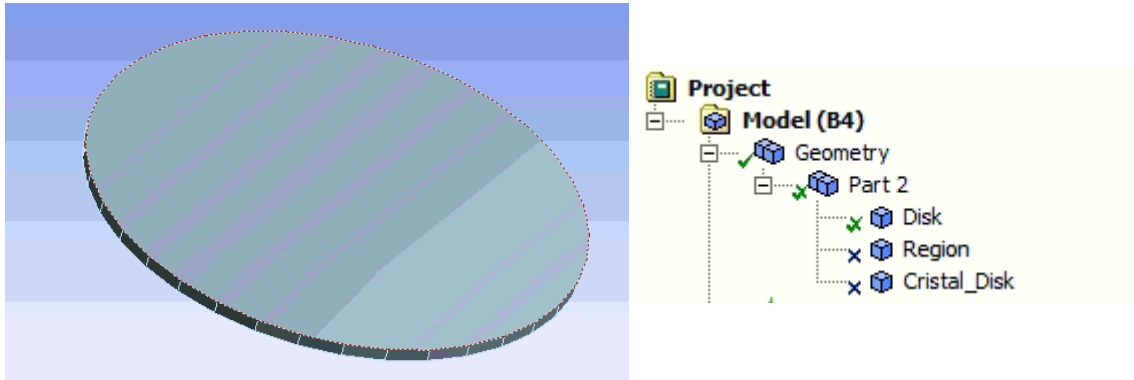


Ilustración 44. Geometría vista desde el *Set Up*  
(Simulación en software Ansys)

A continuación, se continúa trabajando desde la ventana *Set Up* y se realiza el mallado en el disco, para ello se emplea el comando (*Generate mesh*), y en propiedades de mallado, el apartado preferencias físicas se elige mecánicas (*Mechanical*). Se aumenta la precisión del mallado en la cara más próxima a la bobina inductora, modificando las dimensiones del elemento diferencial (*Sizing* → *Element size*). Y se actualiza el mallado (*Updated*).

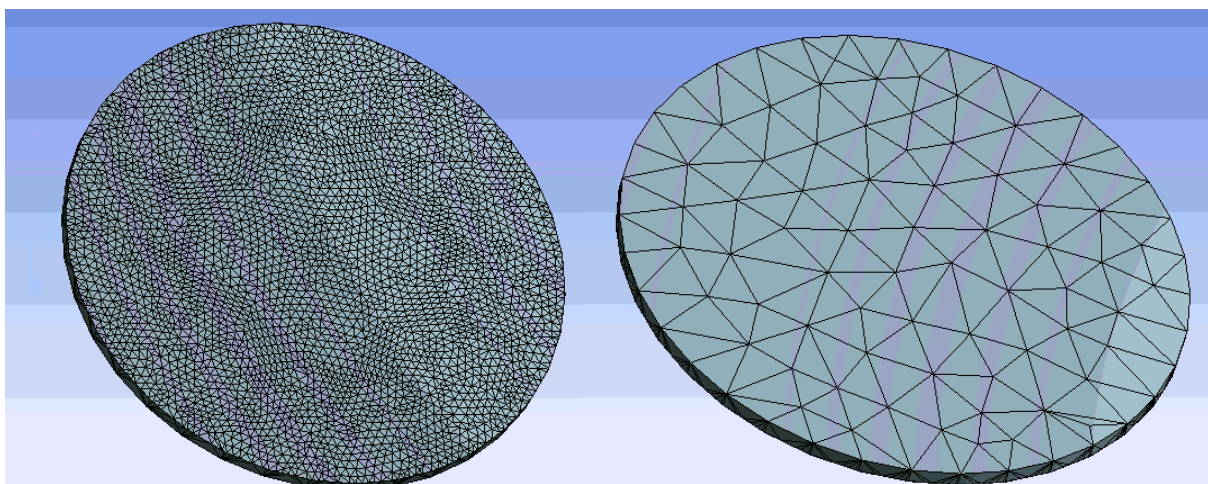


Ilustración 45. Mallado de la cara más próxima a la bobina inductora y más alejada del recipiente ferromagnético  
(Simulación en software Ansys)

Se importa, a partir de las pérdidas óhmicas obtenidas en la simulación electromagnética, la generación de calor sobre la base del recipiente ferromagnético (*Import Load → Heat generation*), gracias a que en un principio se conectaron mediante los operadores. Obsérvese, que tanto las unidades de las pérdidas óhmicas como las del calor son las mismas ( $\text{W/m}^3$ ).

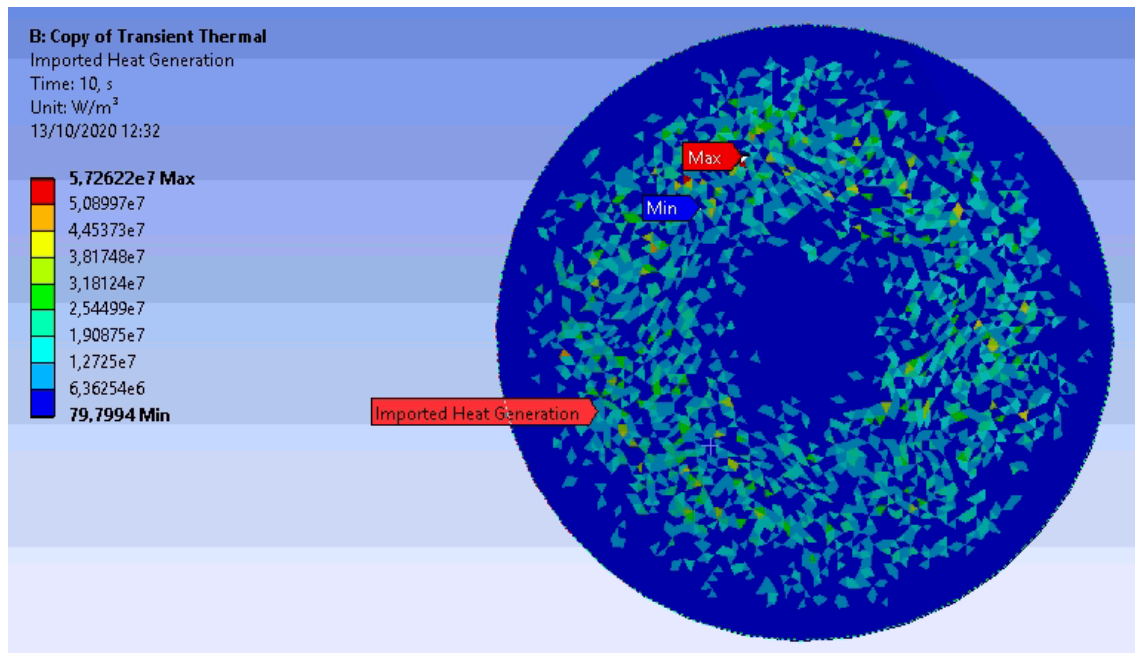


Ilustración 46. Importación de la generación de calor en la base del recipiente ferromagnético (Simulación en software Ansys)

A continuación, se inserta la convección en la cara superior de la base del recipiente ferromagnético (*Insert → Convection*). Como en esta cara no va a haber movimientos especiales del aire que lo rodea, se considera régimen natural y por lo tanto, se le asigna de valor  $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . En la cara inferior no habrá convección puesto que esta cara se encuentra en contacto con el cristal vitrocerámico.

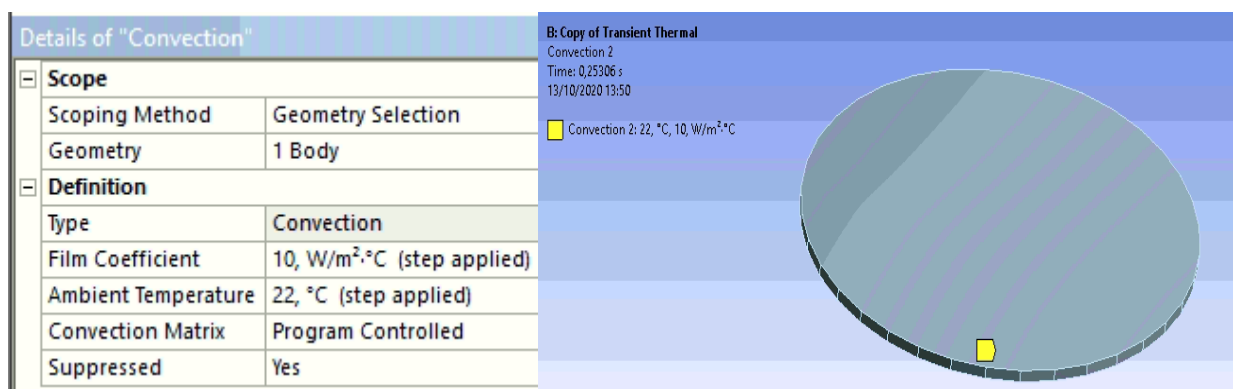
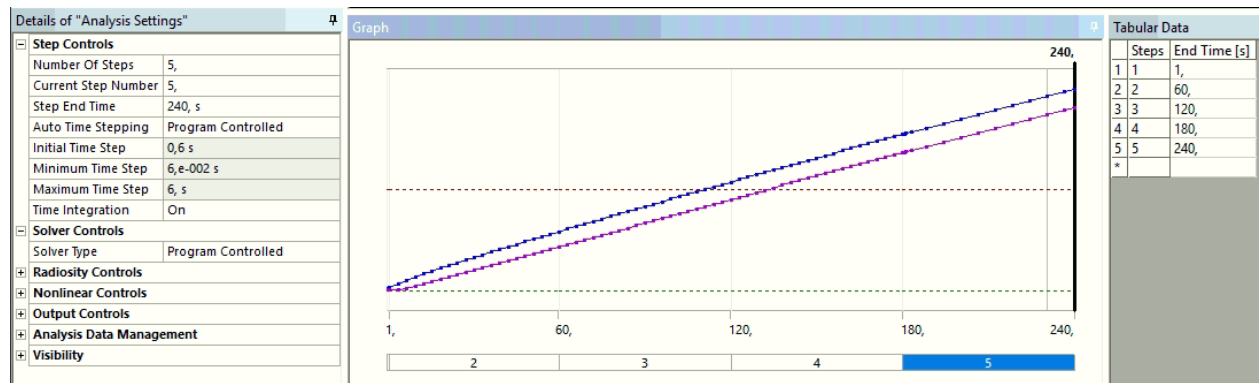


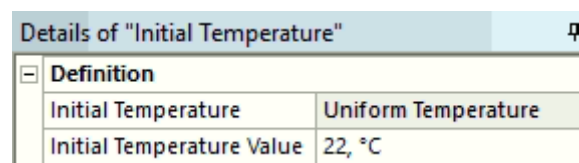
Ilustración 47. Convección aplicada a la cara superior de la base del recipiente ferromagnético (Simulación en software Ansys)

Previo a la simulación se establecen las condiciones de contorno necesarias para dicha simulación (*Analysis Settings*). En este apartado se determinan parámetros tales como: número de pasos (5), duración de la simulación (240 segundos), entre otros.



*Ilustración 48. Condiciones de contorno de la simulación (Simulación en software Ansys)*

Y además, se indicará la temperatura inicial a la que se encuentra la base del recipiente ferromagnético (22°C).



*Ilustración 49. Temperatura inicial a la que se encuentra la base del recipiente ferromagnético (Simulación en software Ansys)*

Por último, se valida el modelo, y una vez comprobado que la simulación es correcta se simula. En el siguiente capítulo se muestran y comentan los resultados obtenidos.

## 10 RESULTADOS

En este capítulo se procederá a mostrar y comentar los resultados obtenidos tanto en la simulación electromagnética como en la simulación térmica transitoria. Se tiene en cuenta que estas máquinas pueden regular la temperatura modificando dos parámetros de entrada, la corriente o la frecuencia. La circulación de valores altos de corriente por el conductor de la bobina inductora pueden provocar altas temperaturas dentro de la placa de inducción, pudiendo ocasionar daños en los asilantes o en los equipos electrónicos internos, es debido a esto por la que se refrigera el sistema con un ventilador. Por esta razón, se decide regular la temperatura variando los valores de frecuencia, por este motivo, se han analizado los parámetros en función de los diferentes valores de frecuencia.

Y, posteriormente, se validarán los resultados obtenidos, es decir, se explicará en qué datos o cálculos se ha basado el proyecto para justificar que los resultados obtenidos en las simulaciones son correctos.

### 10.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Se tratará de mostrar visualmente la distribución de parámetros como: inducción magnética (B), campo magnético (H), densidad de corriente (J) y pérdidas ohmicas (Ohmic-Loss). Estas distribuciones será interesantes visualizarlas en el disco que simula la base del recipiente ferromagnético. Para ello se procederá con los comandos pertinentes, seleccionando previamente el disco (*Maxwell 3D* → *Fields* → *Fields* → *J* → *Vector\_J*). Y se seleccionará que se dibuje en la cara de la figura (*Plot on surface only* → *CHECK*). Se seguirá este mismo proceso para el resto de parámetros.

A continuación, se representarán las distribuciones de los parámetros citados, en la base del recipiente ferromagnético, para los distintos valores de frecuencia:

## INDUCCIÓN MAGNÉTICA (B)

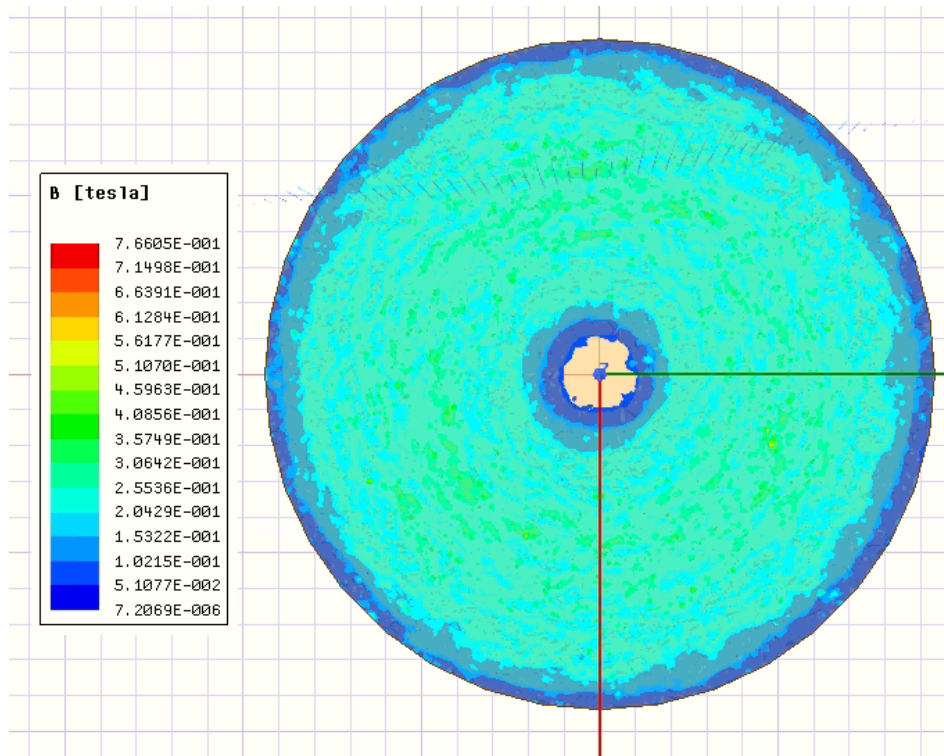


Ilustración 50. Inducción magnética para **20 kHz**  
(Simulación en software Ansys)

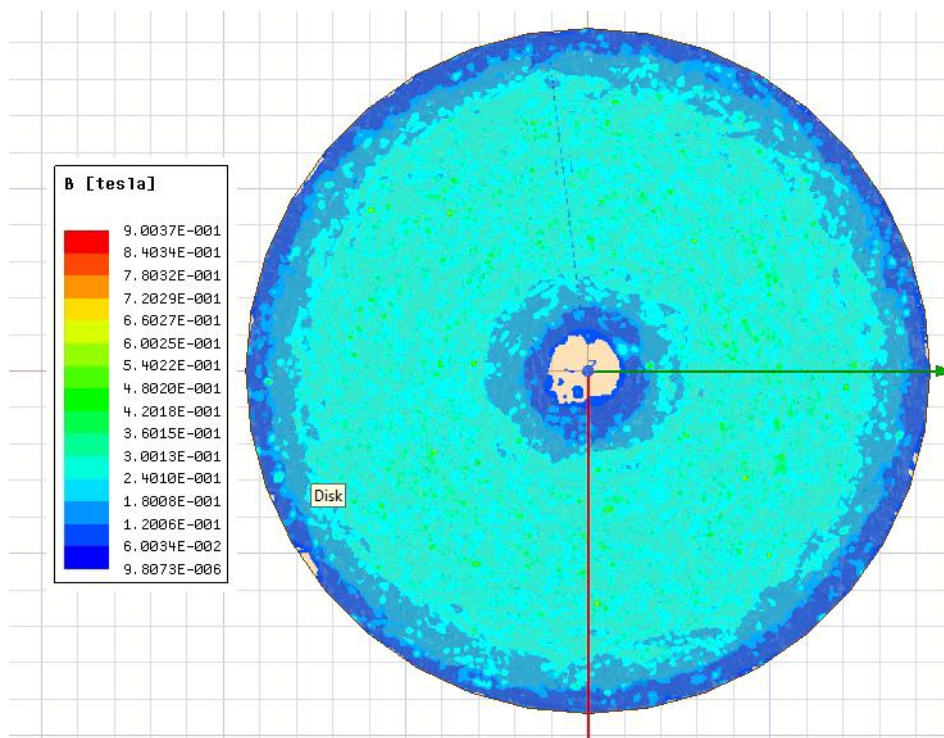
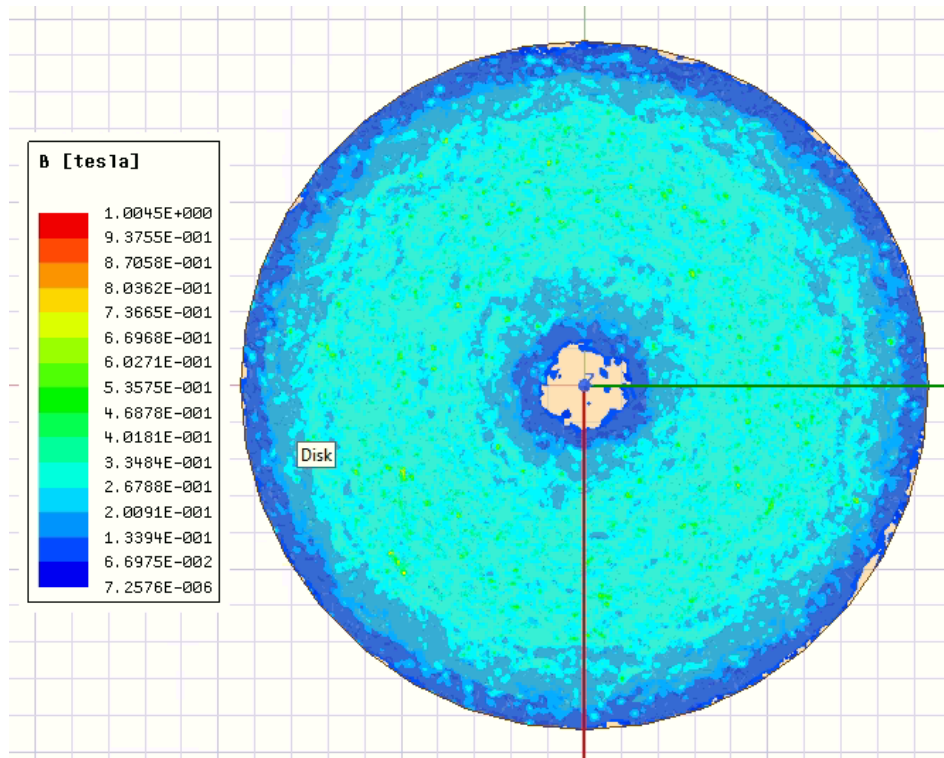
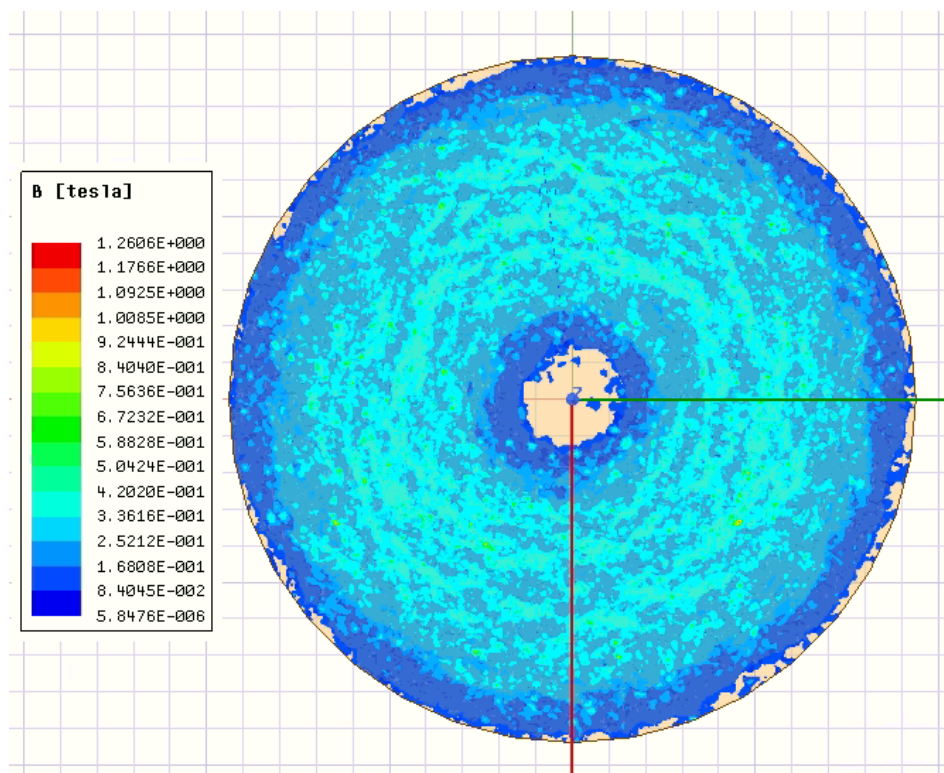


Ilustración 51. Inducción magnética para **23 kHz**  
(Simulación en software Ansys)

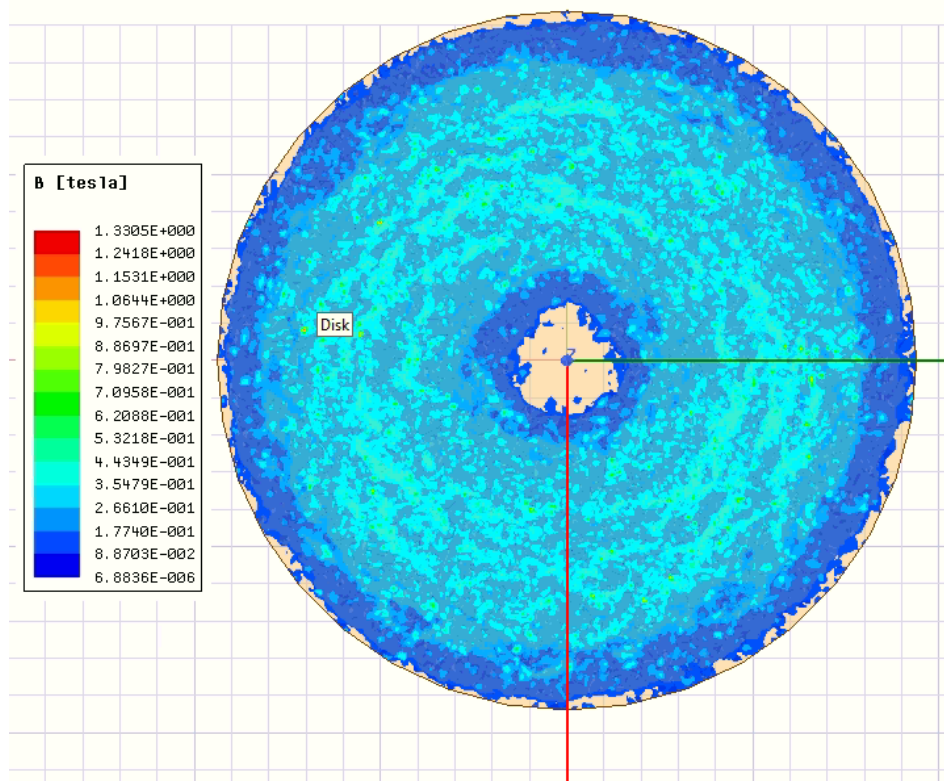




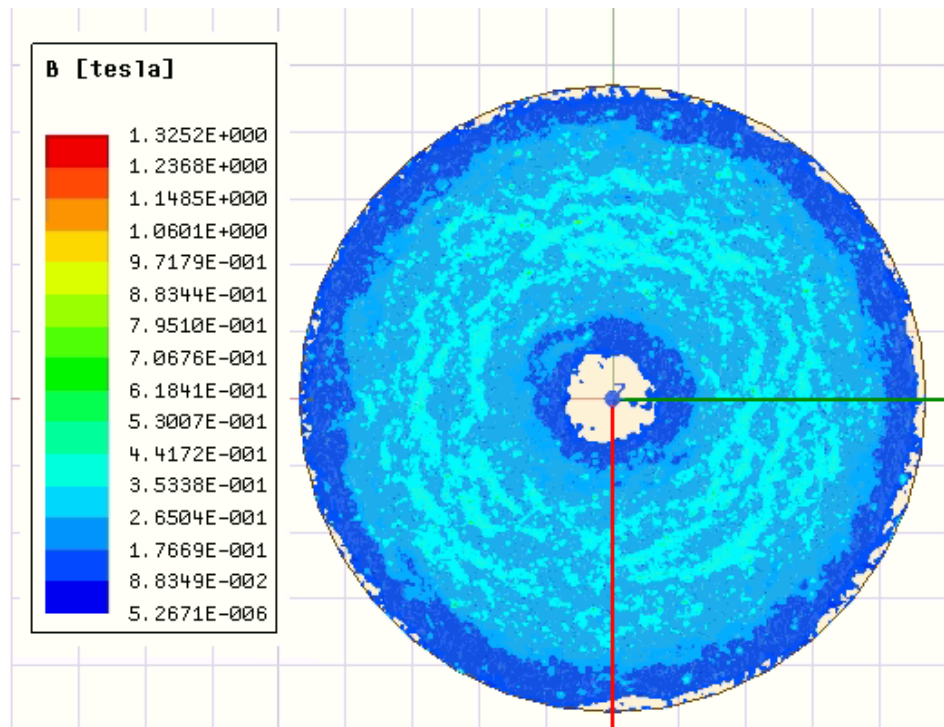
*Ilustración 52. Inducción magnética para 30 kHz  
(Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 53. Inducción magnética para 40 kHz  
(Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 54. Inducción magnética para 50 kHz  
(Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 55. Inducción magnética para 60 kHz  
(Simulación en software Ansys)*

Se han representado la distribuciones de la inducción magnética para las diferentes frecuencias en la base del recipiente ferromagnético, tomando como unidad de medida el Tesla.

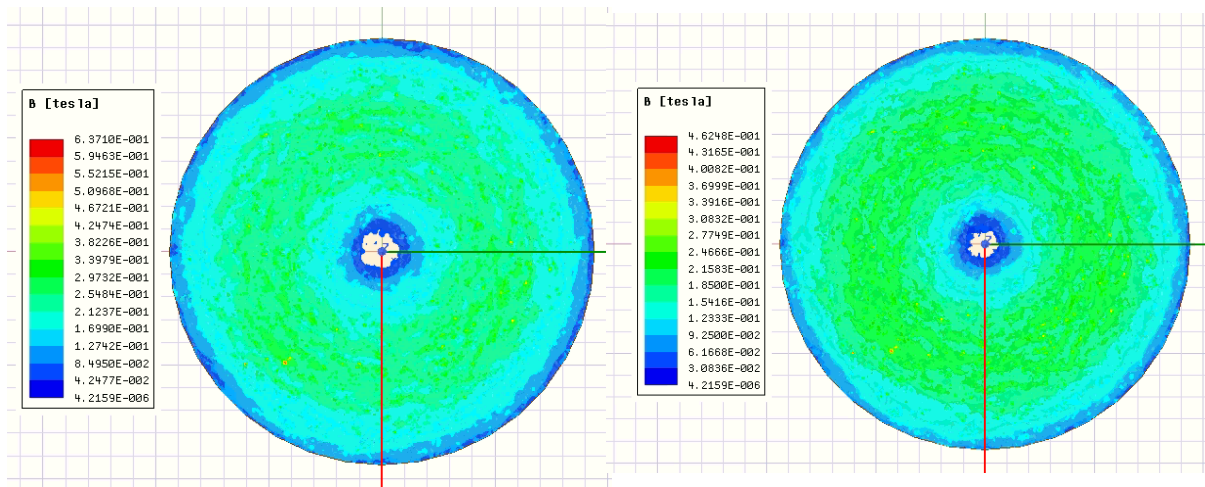
La inducción magnética, como se vió en los cálculos, es inversamente proporcional a la frecuencia, luego cuanto mayor es la frecuencia menor es la inducción magnética. Debido a que se trabaja con valores de frecuencia muy elevados, se alcanzan valores de inducción magnética muy pequeños.

Se observa que la distribución que toma esta en la base del recipiente ferromagnético tiene forma de anillo, siendo más intensa en la línea media de este y disminuyendo a medida que el anillo se desplaza hacia la periferia o el centro. Para realizar una correcta interpretación de las distribuciones mostradas se debe observar que las escalas de colores no son idénticas en todas las ilustraciones, es más, sino que estas son un poco más elevadas para mayores frecuencias, lo que resultaría incoherente. No obstante, esta variación de las escalas es muy pequeña, y se contrarresta, ya que se observa una distribución más oscura a medida que aumenta la frecuencia, luego esto implica que la inducción magnética disminuye a medida que aumenta la frecuencia, tal como se explicó en los cálculos.

La inducción magnética es generada por la corriente alterna que atraviesa la bobina inductora, luego de igual manera que dicha corriente, tiene carácter senoidal. Esto quiere decir que dependiendo de la fase en la que se encuentre la onda sus valores variarán. Para la comparación de los resultados en función de las diferentes frecuencias se ha tomado la misma fase ( $0^\circ$ ). De todos modos, a continuación, se muestra cómo varían los valores de inducción magnética en función de las diferentes fases para una frecuencia fija de 23 kHz.

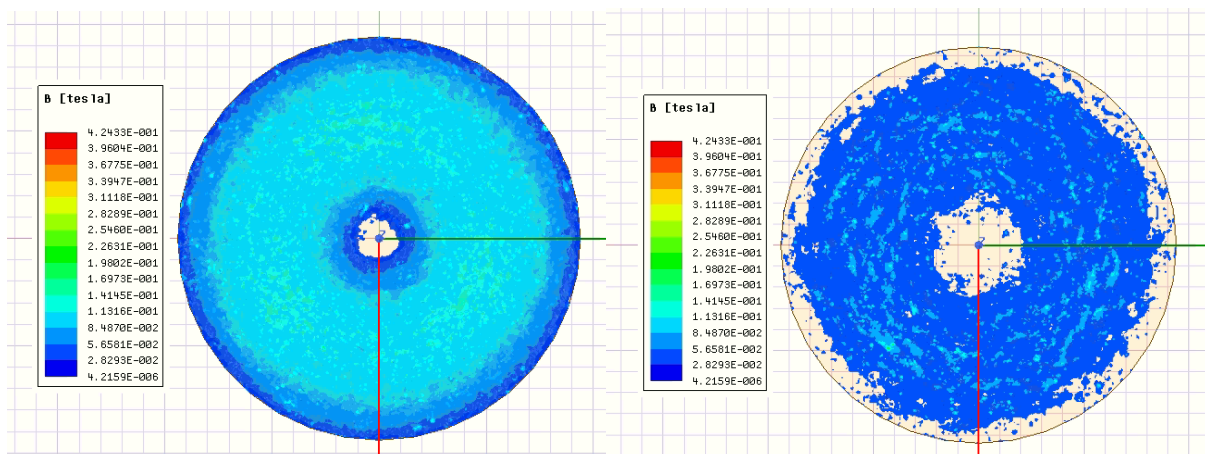


## INDUCCIÓN MAGNÉTICA (B) para 23 kHz



*Ilustración 56. Inducción magnética para 0°  
(Simulación en software Ansys)*

*Ilustración 57. Inducción magnética para 30°  
(Simulación en software Ansys)*

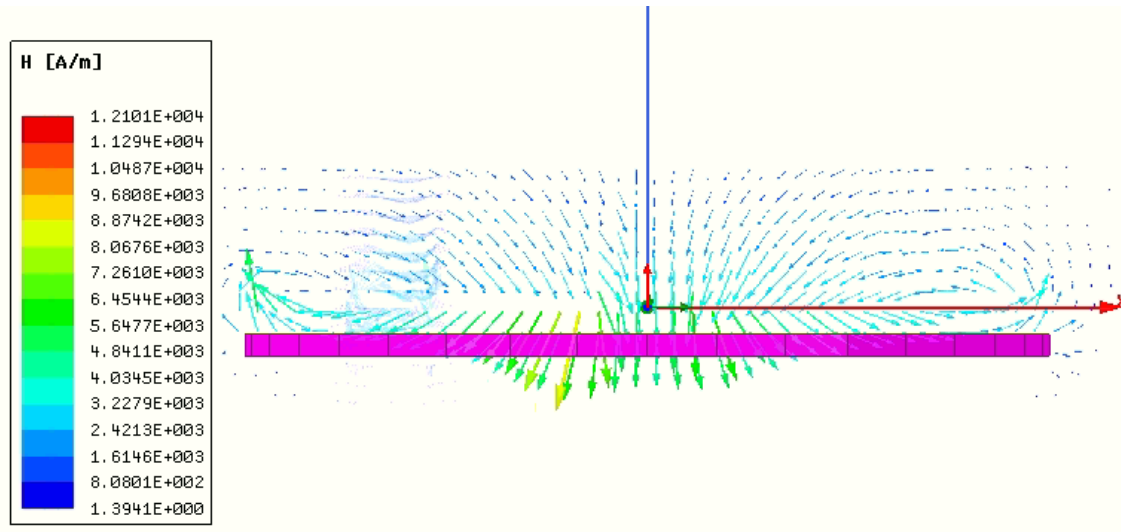


*Ilustración 58. Inducción magnética para 60°  
(Simulación en software Ansys)*

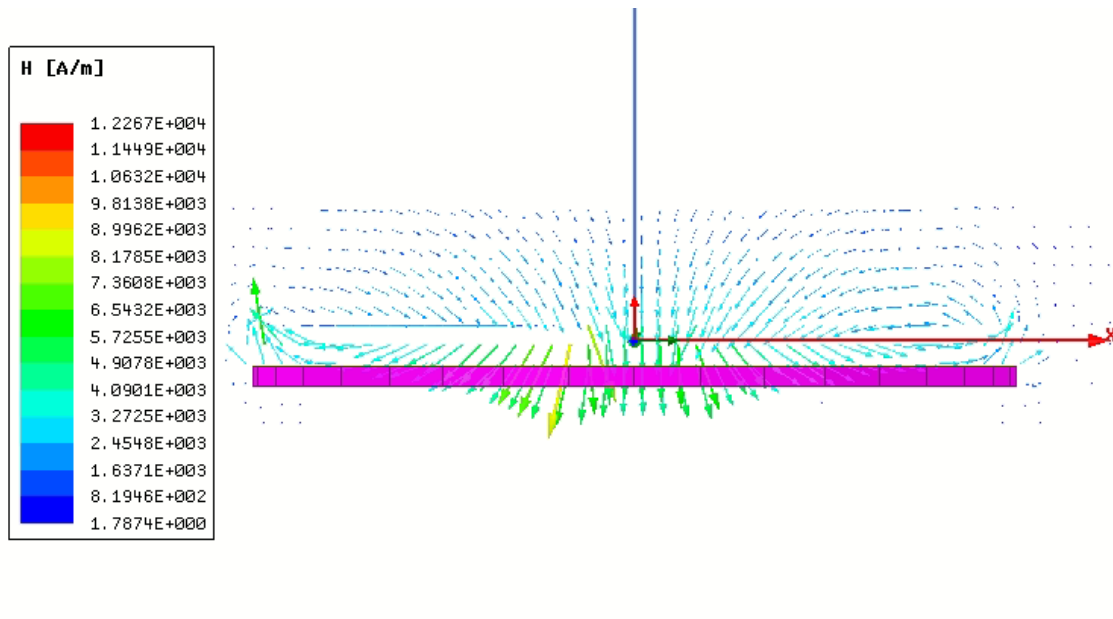
*Ilustración 59. Inducción magnética para 90°  
(Simulación en software Ansys)*

Se han representado las distribuciones de la inducción magnética para una frecuencia de 23 kHz en función de las diferentes frecuencias. Se observa que la forma que se obtiene siempre es la misma, forma de anillo siendo menos intenso a medida que se acerca a los bordes. La inducción magnética al ser senoidal irá aumentando y disminuyendo en función de la fase rigiéndose por su carácter senoidal. Obviamente, lo ideal es que la máquina funcionase en la fase que la inducción magnética alcanza su valor más elevado. Para una interpretación adecuada de las distribuciones mostradas se debe observar que las escalas de valores no son idénticas.

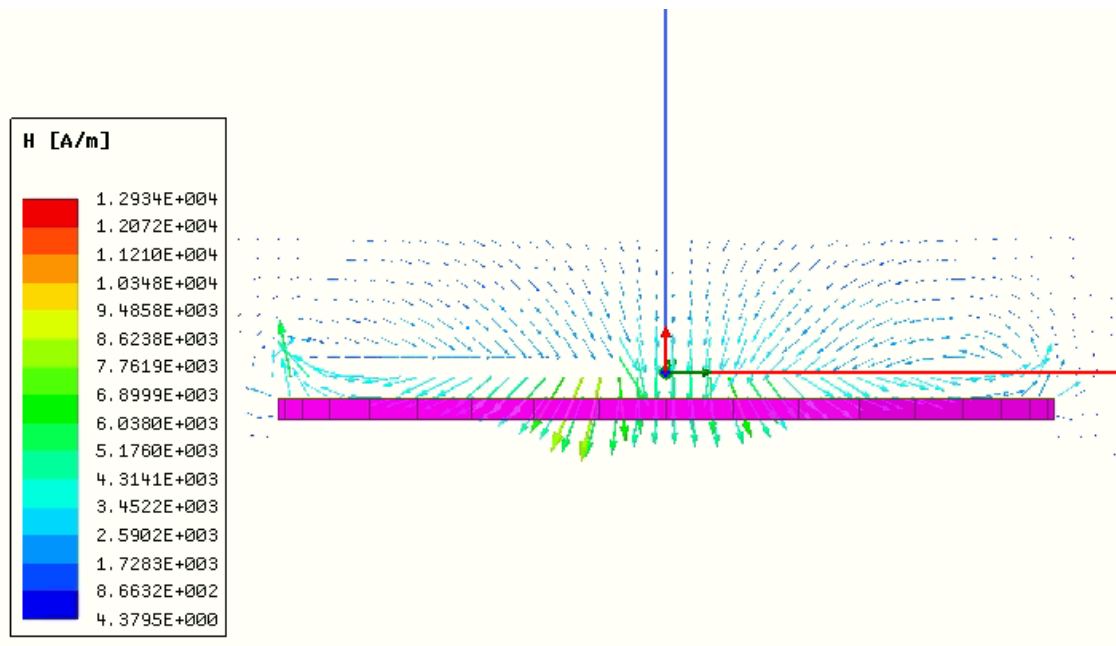
## CAMPO MAGNÉTICO (H)



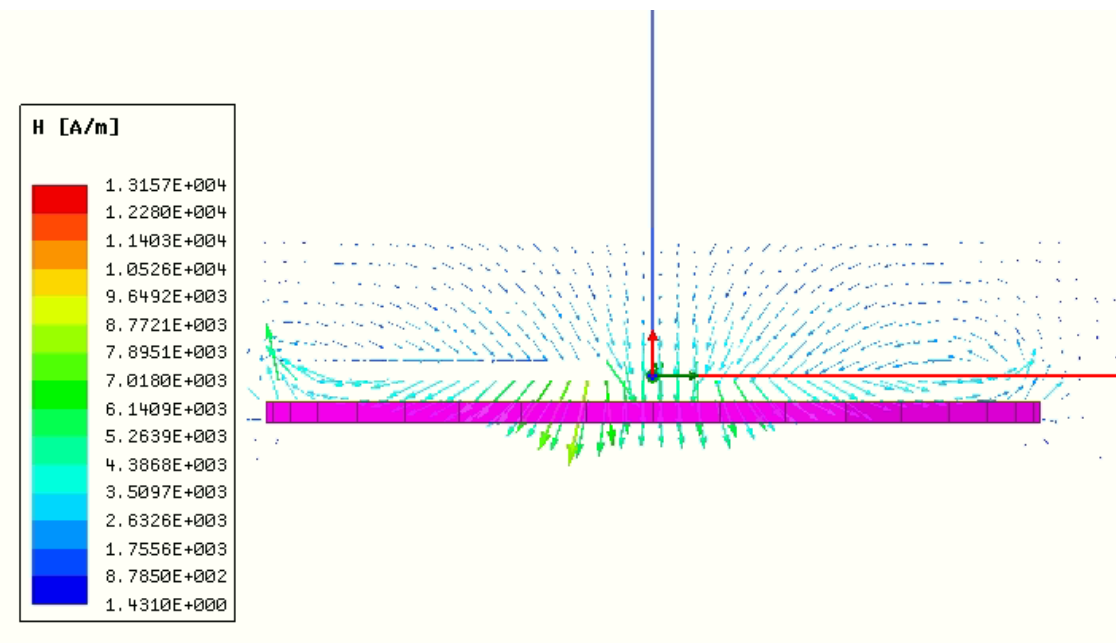
*Ilustración 60. Campo magnético para 20 kHz  
(Simulación en software en Ansys)*



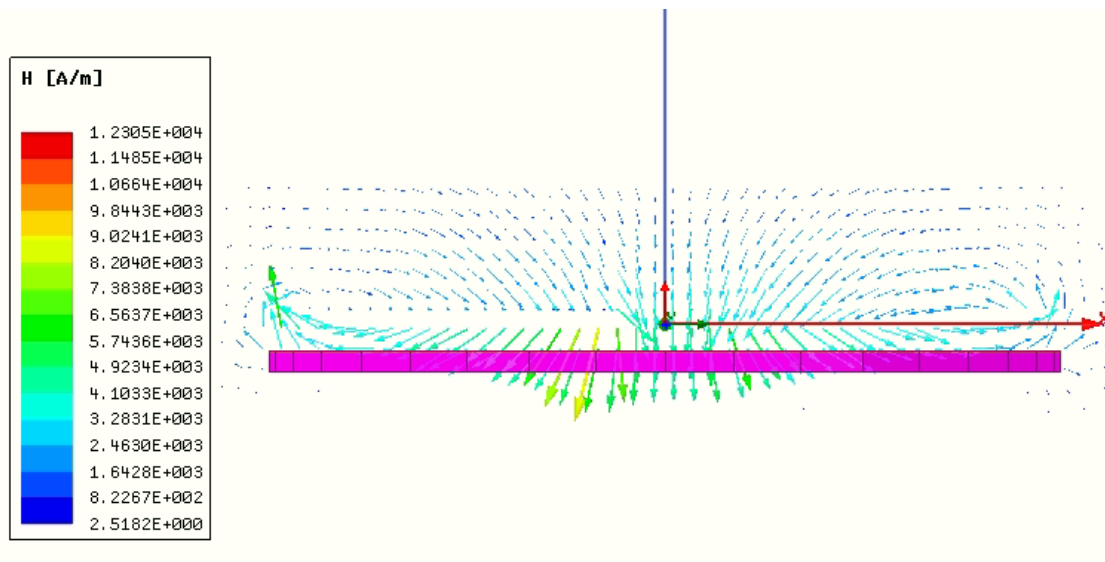
*Ilustración 61. Campo magnético para 23 kHz  
(Simulación en software en Ansys)*



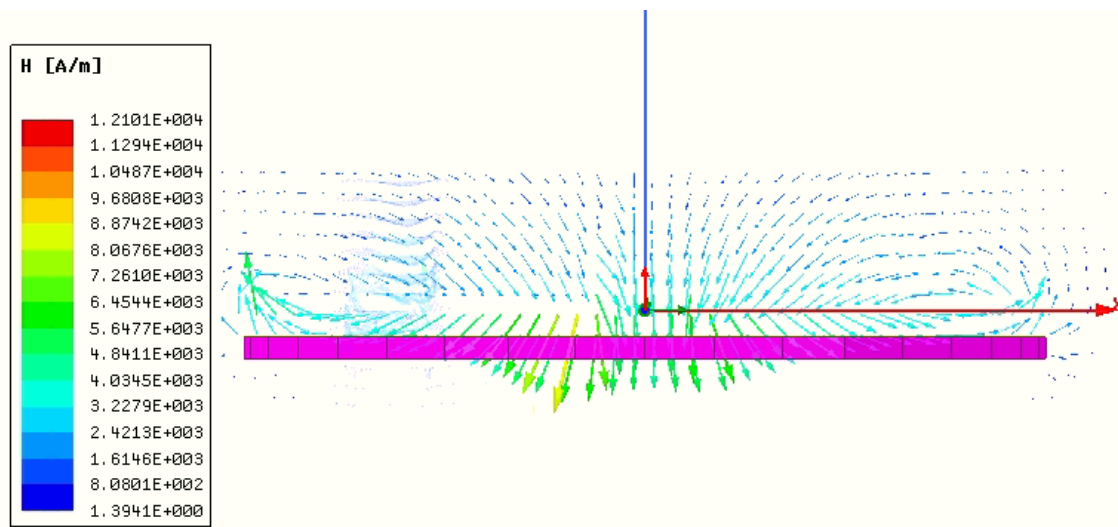
*Ilustración 62. Campo magnético para 30 kHz  
(Simulación en software en Ansys)*



*Ilustración 63. Campo magnético para 40 kHz  
(Simulación en software en Ansys)*



*Ilustración 64. Campo magnético para 50 kHz  
(Simulación en software en Ansys)*



*Ilustración 65. Campo magnético para 60 kHz  
(Simulación en software en Ansys)*

Se han representado las distribuciones del campo magnético para las diferentes frecuencias, tomando como unidad de medida amperio dividido por metro, o lo que es lo mismo, Henrio. Debido a que el campo magnético actúa en un plano perpendicular a la inducción magnética, en este caso, será interesante observar la base del recipiente desde un plano frontal.

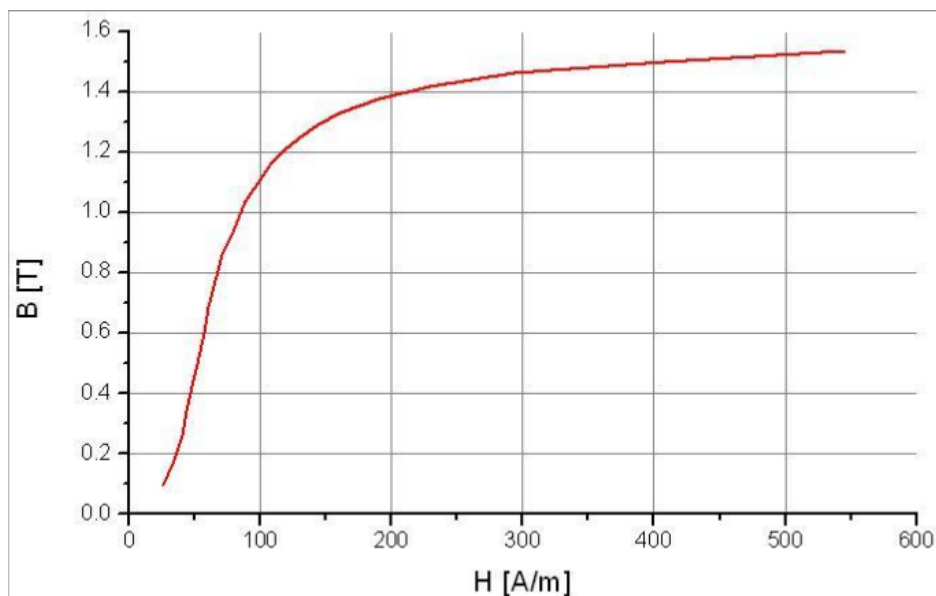
La permeabilidad magnética es la capacidad que tiene un material de afectar o ser afectado por un campo magnético, por lo tanto este relaciona la inducción magnetica con el campo magnético. Luego, se podrá obtener el campo magnético a partir de la inducción magnética, a partir de la siguiente expresión:

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{B}{\mu_r \cdot \mu_0}$$

Siendo:  $\mu_r$ , permeabilidad relativa, valor característico de cada material

$\mu_0$ , permeabilidad en el vacío, parámetro constante

Debido a que se trabaja con un material ferromagnético no se trata de una relación lineal, sino que su función corresponderá con la curva de imanación del material:



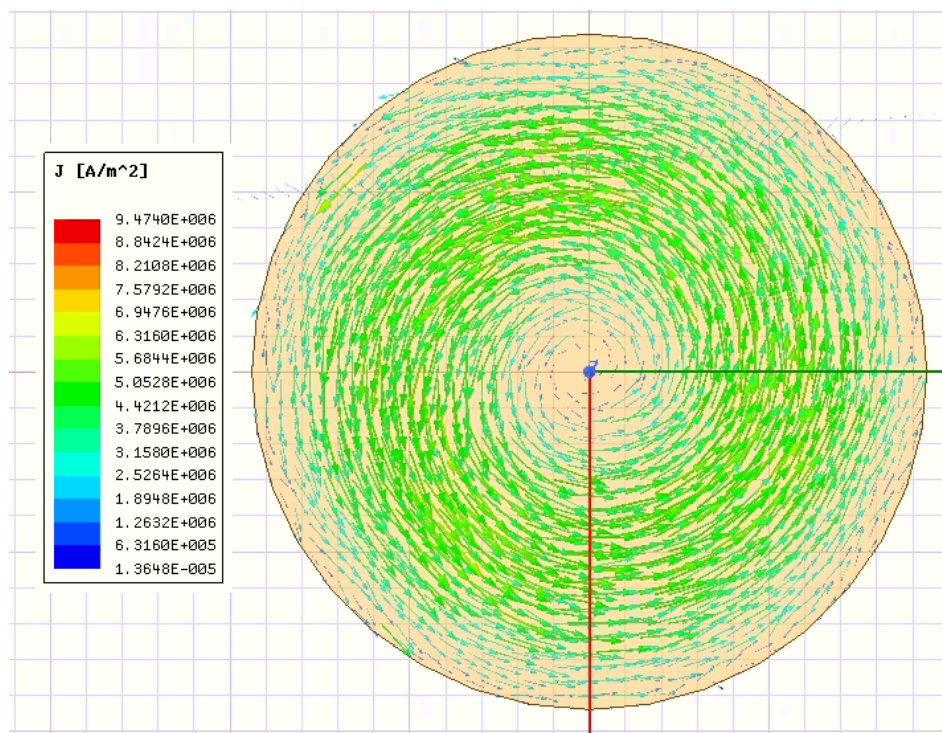
*Ilustración 66. Curva de imanación de un material ferromagnético (Januario, Marconi. Modelo de transformador en función de la frecuencia. Abril, 2017)*

Se puede concluir que a medida que aumente la inducción magnética aumentará el campo magnético, luego se deduce que a mayores valores de frecuencia menor será el campo magnético, a pesar de que su valor no varíe mucho.

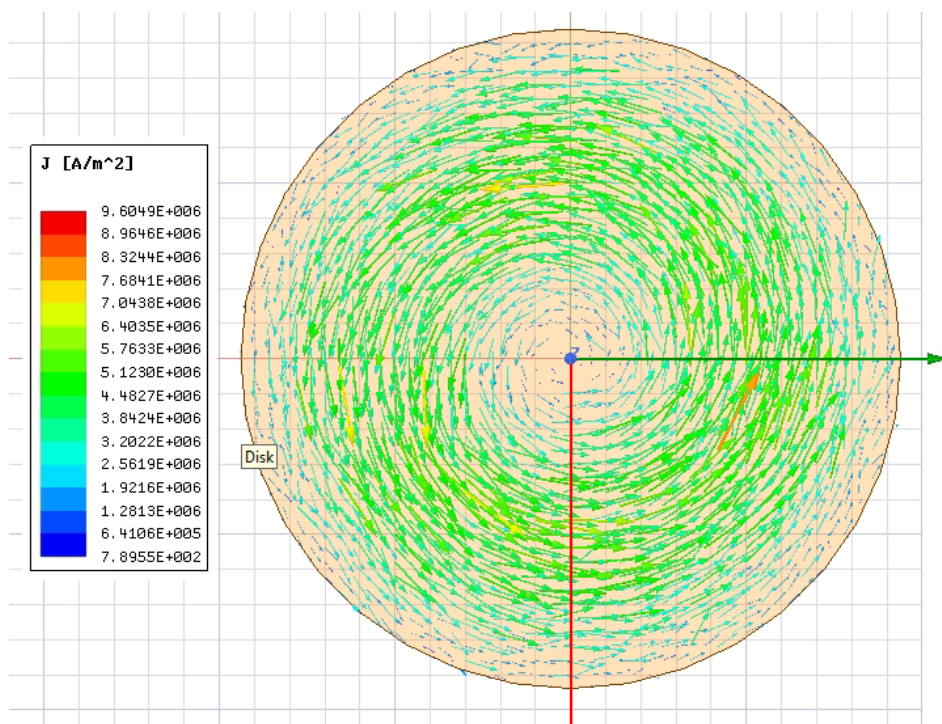
En las imágenes para una mayor simplicidad de visualización se han eliminado tanto el disco que representa el cristal vitrocerámica, que iría apoyado en la parte superior del disco representado, como la bobina inductora, que iría en la parte superior del cristal vitrocerámico, tal como se puede observar en la ilustración 52. Encima de dicha bobina irán tres ferritas cuya función es redirigir estas líneas de campo magnético. La bobina y las ferritas, se encuentran alineadas con los ejes. En las distribuciones se puede ver como las líneas de campo magnético son cerradas. Gracias a las ferritas, estas líneas se redirigen de tal manera que se intensifican en la dirección que atraviesa la base del recipiente ferromagnético.



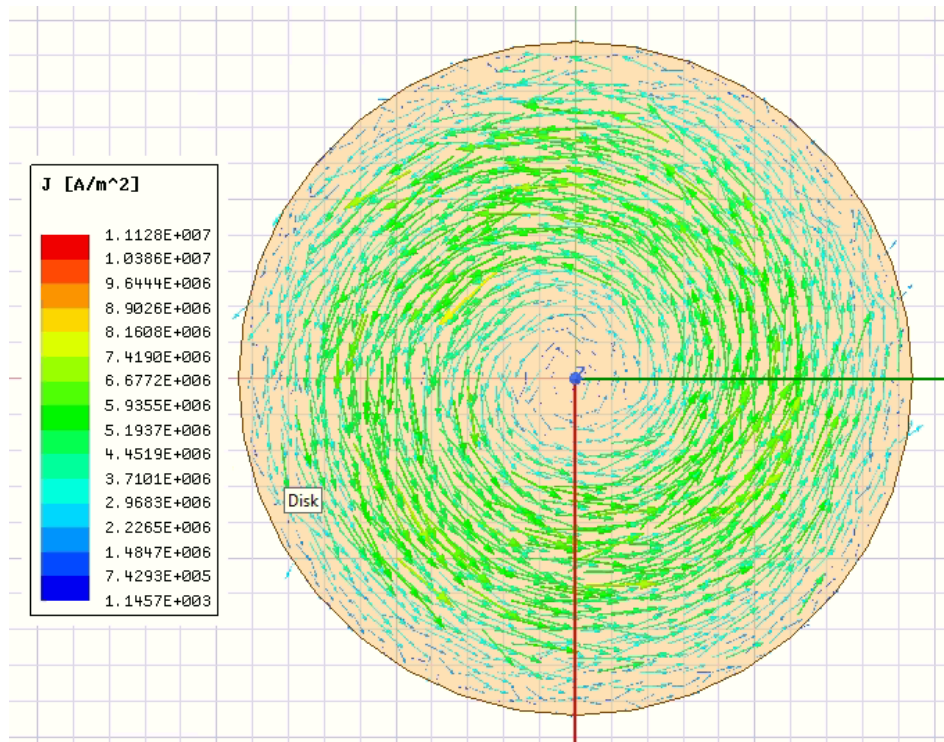
## DENSIDAD DE CORRIENTE (J)



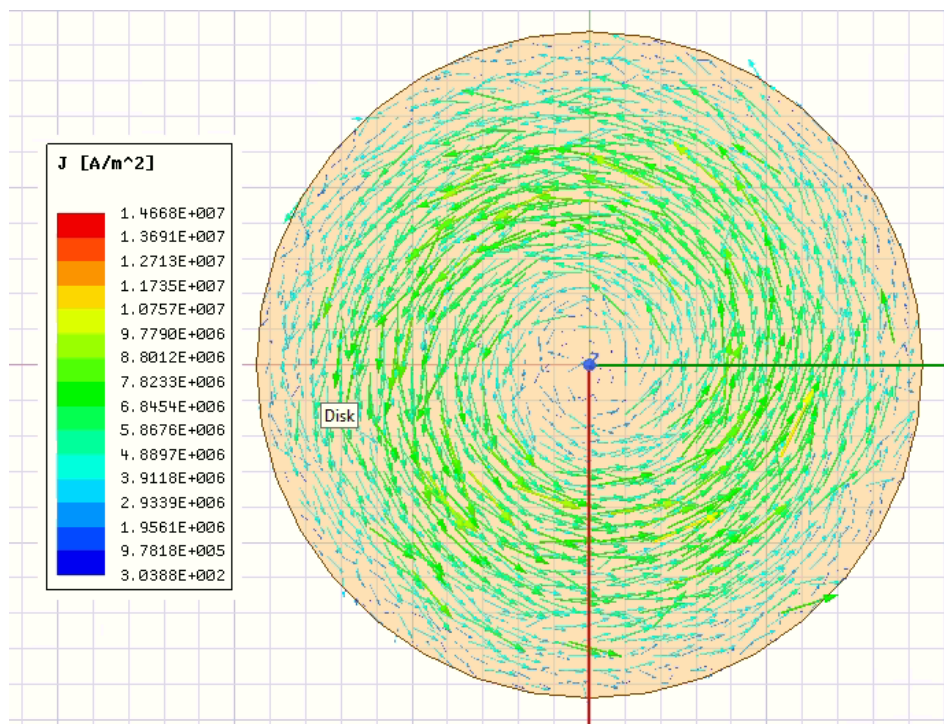
*Ilustración 67. Densidad de corriente para 20 kHz  
(Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 68. Densidad de corriente para 23 kHz  
(Simulación en software Ansys)*

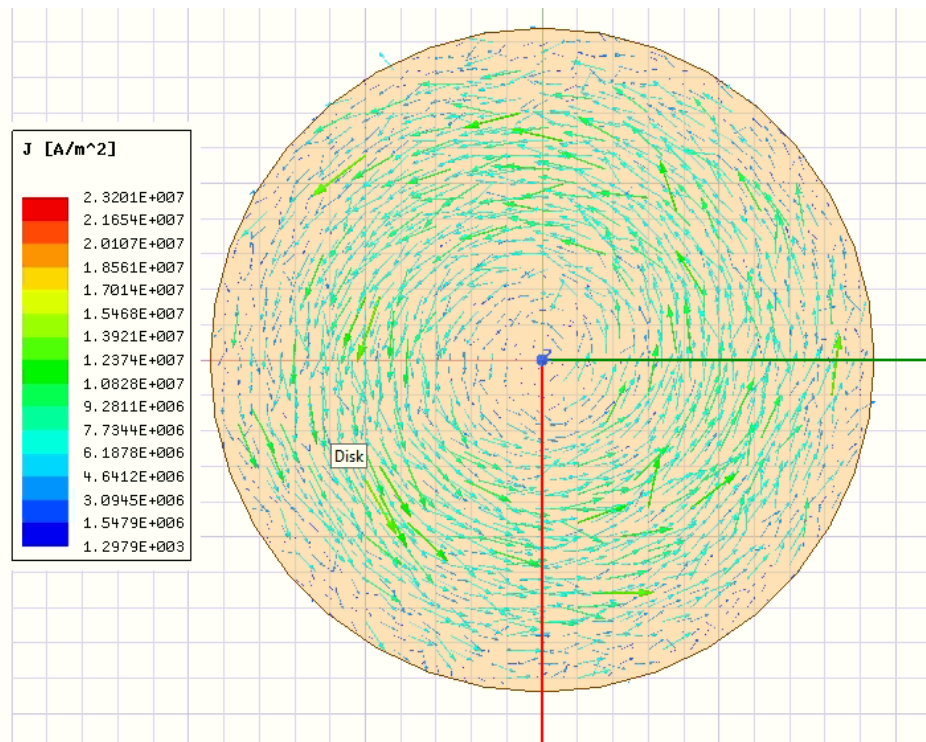


*Ilustración 69. Densidad de corriente para **30 kHz**  
(Simulación en software Ansys)*

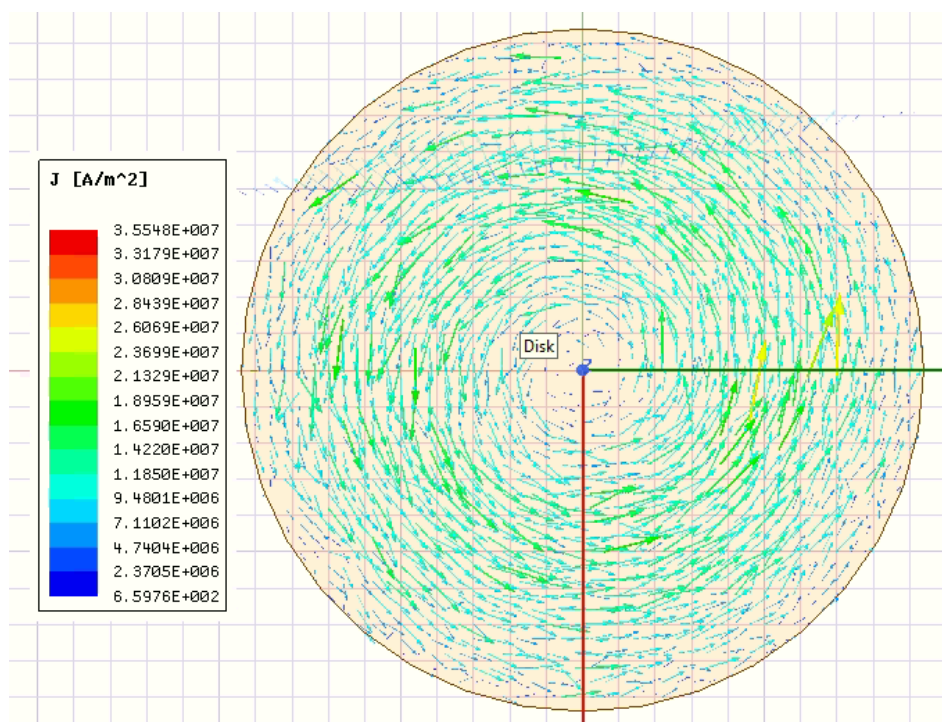


*Ilustración 70. Densidad de corriente para **40 kHz**  
(Simulación en software Ansys)*





*Ilustración 71. Densidad de corriente para 50 kHz  
(Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 72. Densidad de corriente para 60 kHz  
(Simulación en software Ansys)*

Se han representado las distribuciones de densidad de corriente para las diferentes frecuencias, tomando como unidad de medida julios dividido de amperio al cuadrado.

La corriente aumenta a medida que aumenta la frecuencia, y por lo tanto, la densidad de corriente también aumenta. El sentido de la corriente se puede obtener aplicando la ley de la mano derecha. Y su distribución coincide con la inducción magnética, teniendo forma de anillo, siendo más intensa en la línea media de esto y disminuyendo según se desplaza hacia la periferia o el centro. Para interpretar correctamente las distribuciones, es necesario fijarse en las escalas que acompañan a cada distribución, puesto que son independientes para cada ilustración. Por lo que, aunque parecen más intensas para menores frecuencias, atendiendo a los colores y escalas se observa que la densidad de corriente es mayor para las frecuencias más elevadas.

## PÉRDIDAS ÓHMICAS

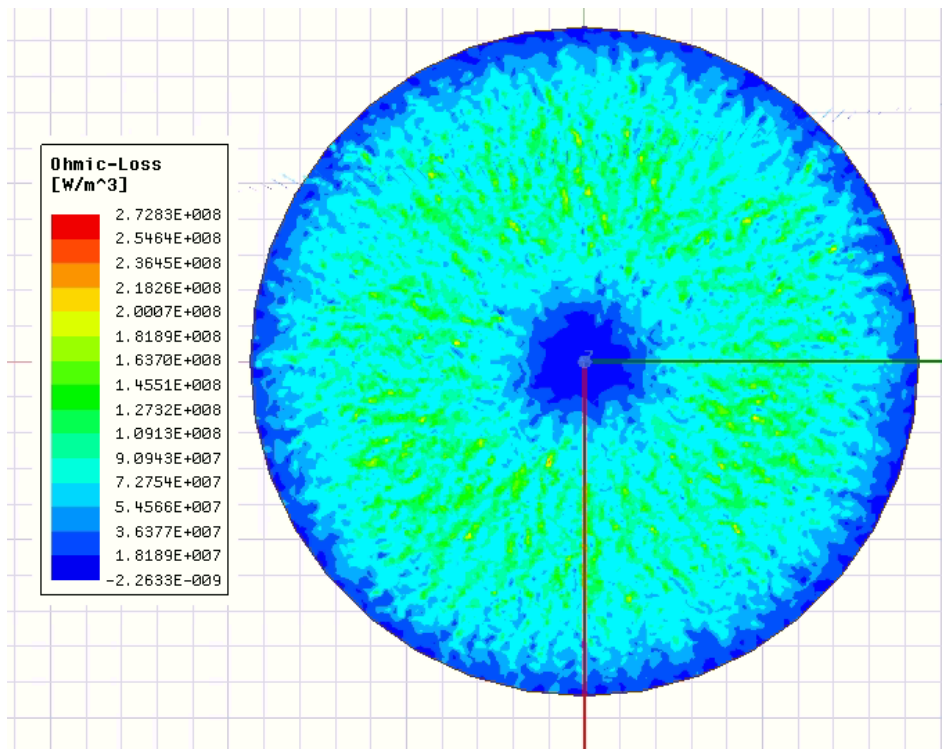


Ilustración 73. Pérdidas óhmicas para **20 kHz**  
(Simulación en software Ansys)

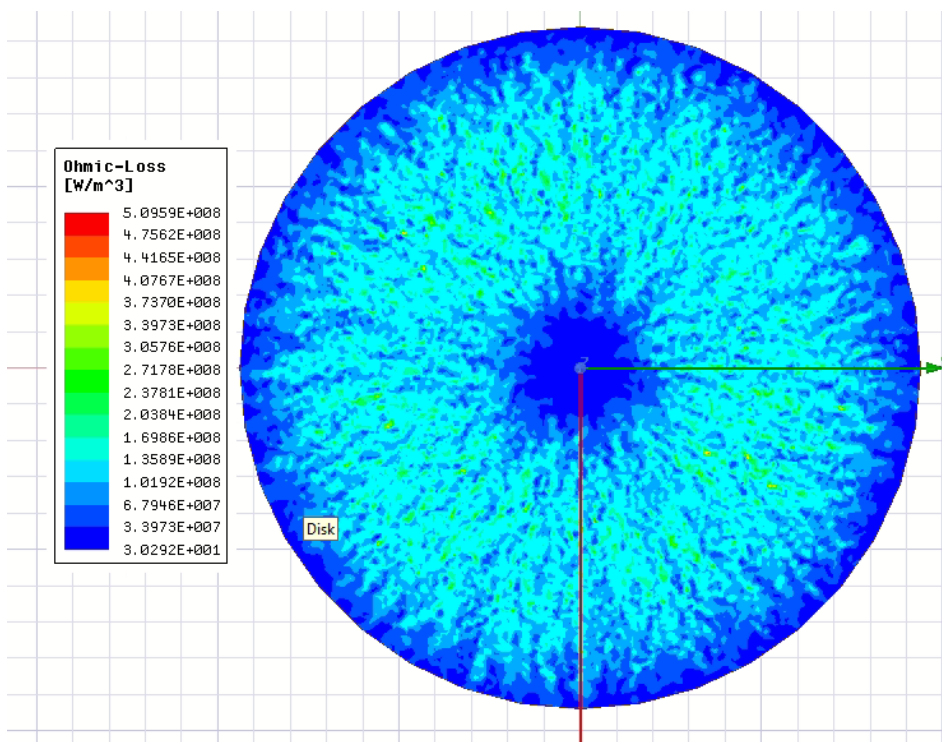
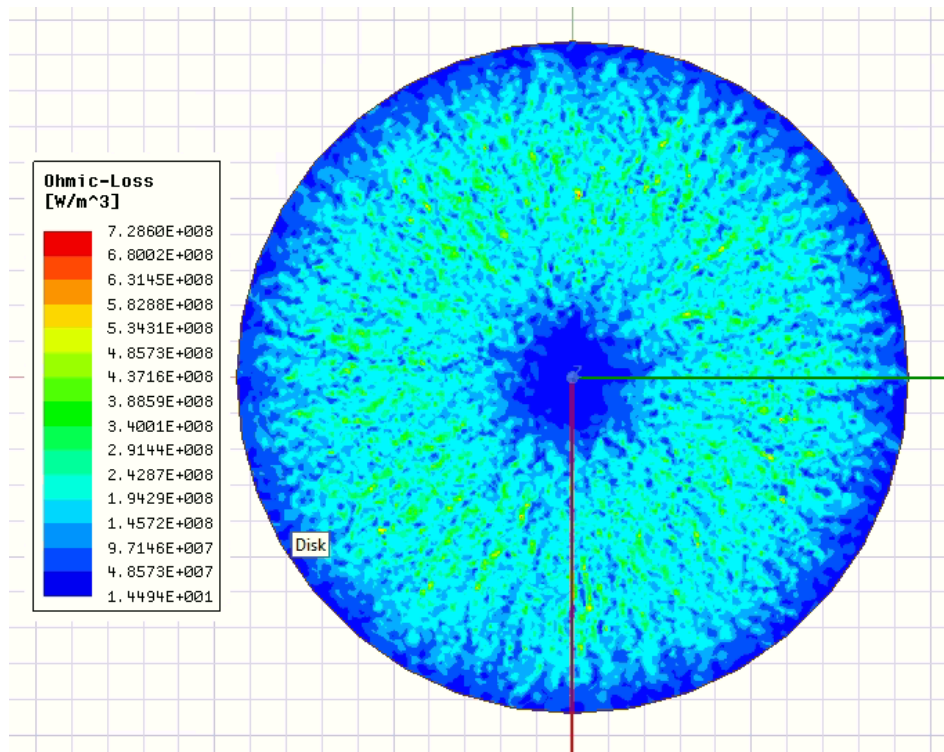
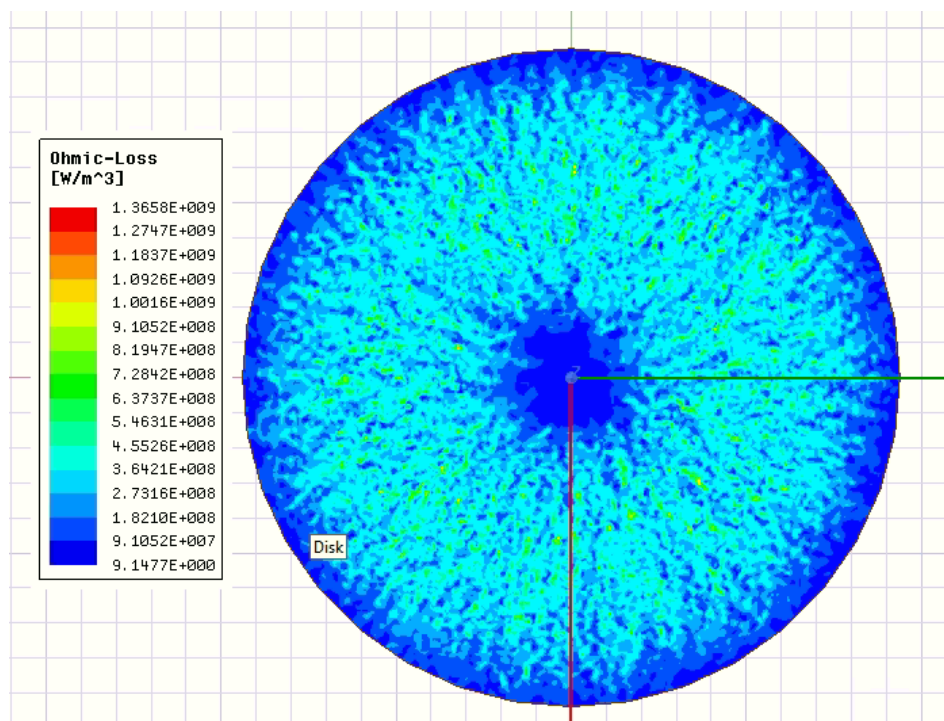


Ilustración 74. Pérdidas óhmicas para **23 kHz**  
(Simulación en software Ansys)



*Ilustración 75. Pérdidas óhmicas para 30 kHz  
(Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 76. Pérdidas óhmicas para 40 kHz  
(Simulación en software Ansys)*



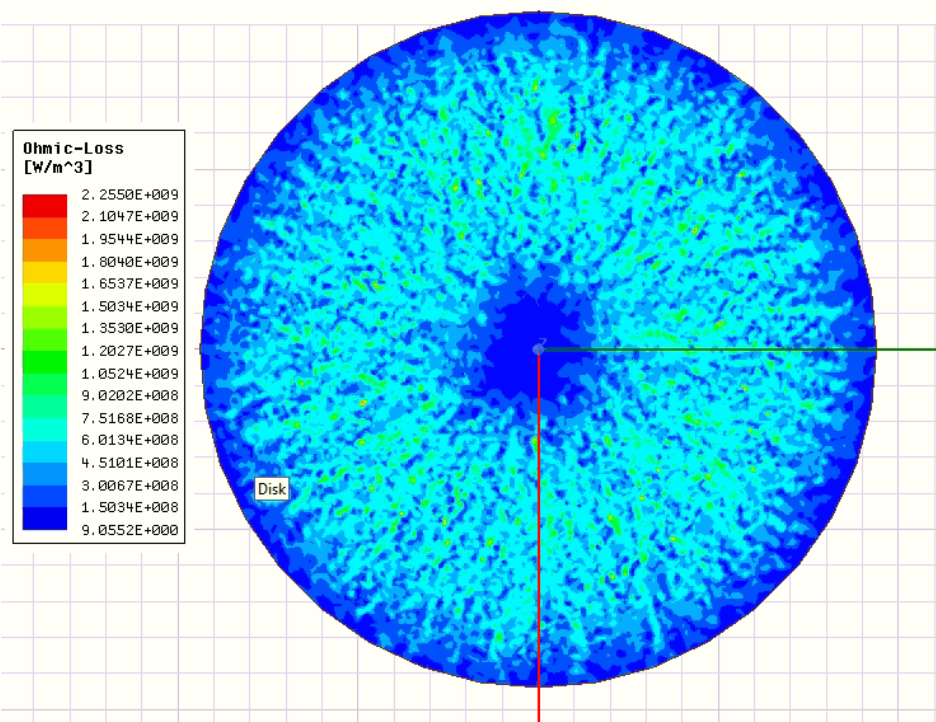


Ilustración 77. Pérdidas óhmicas para **50 kHz**  
(Simulación en software Ansys)

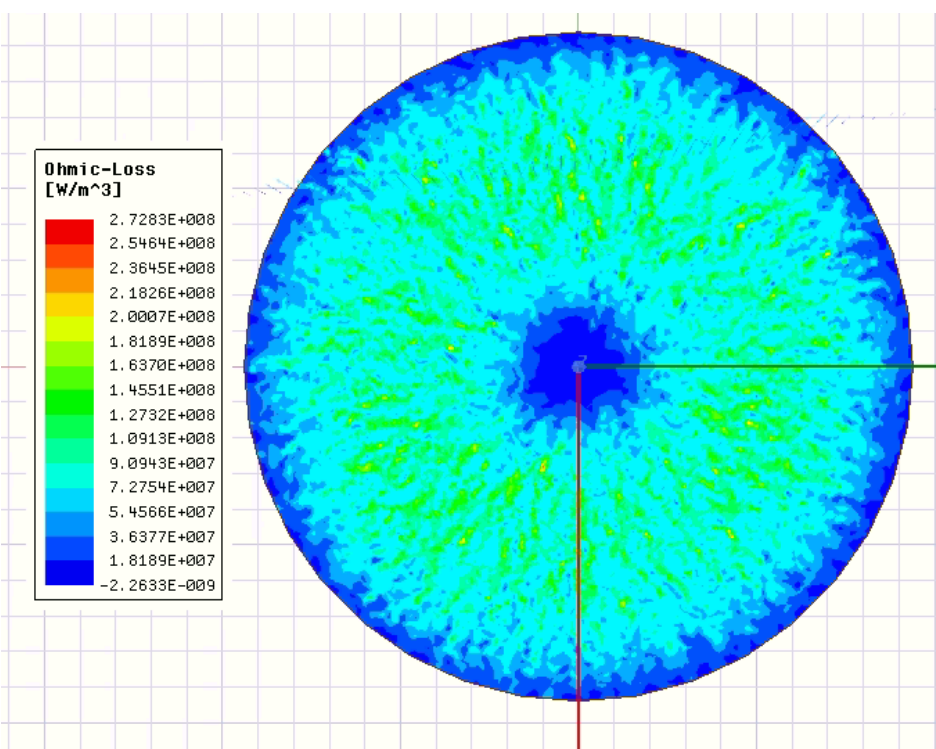


Ilustración 78. Pérdidas óhmicas para **60 kHz**  
(Simulación en software Ansys)

Se han representado las distribuciones de las pérdidas ohmicas para las diferentes frecuencia, tomando como unida de medida el watio dividido por metro cúbico.

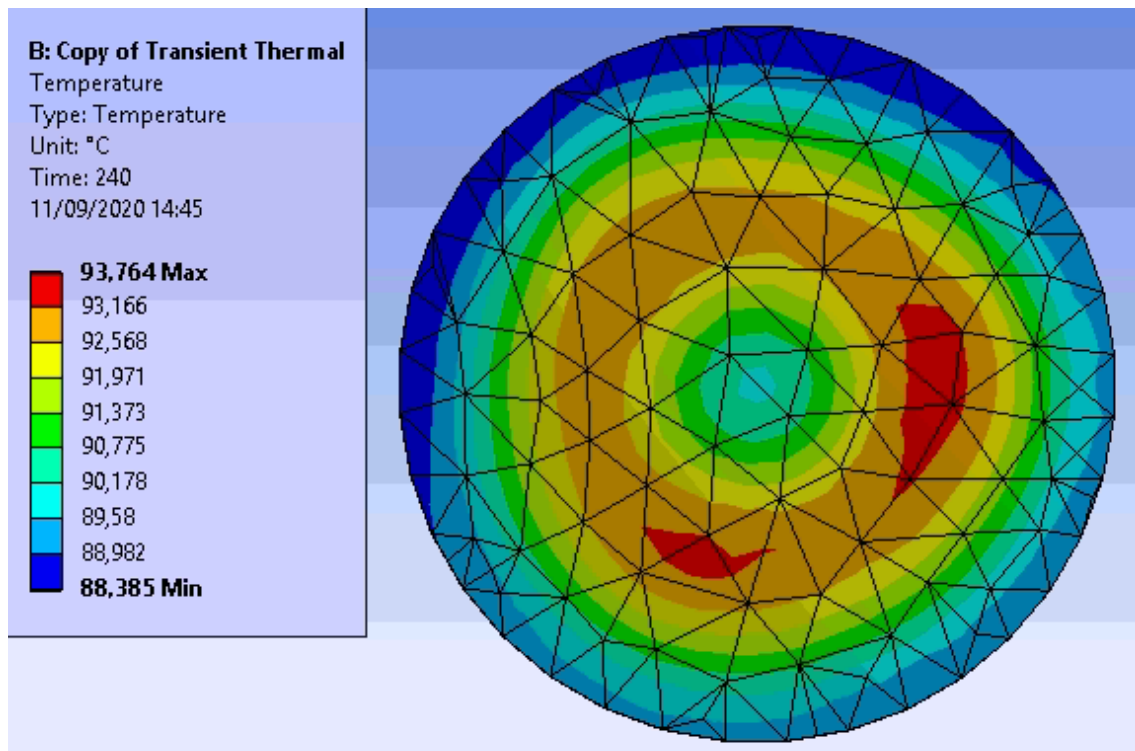
Las pérdidas ohmicas aumentarán con la corriente, y por consiguiente, también con la frecuencia. Su distribución posee la misma forma que para la inducción magnética o la densidad de corriente, pues tiene forma de anillo siendo mayor en la línea media de este y disminuyendo hacia la periferia o el centro.

## 10.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA TRANSITORIA

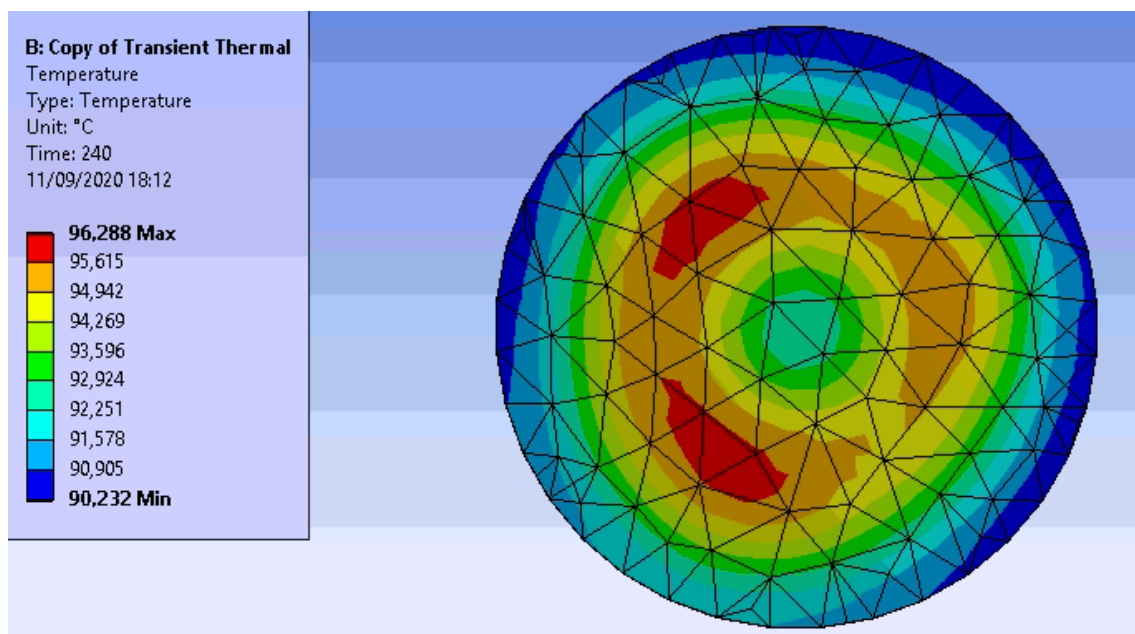
Se procede a mostrar la distribución de la temperatura en la base del recipiente ferromagnético para las distintas frecuencias, se mostrará dicha distribución tanto para la cara que se encuentra en contacto con el cristal vitrocerámico como la cara que está en contacto con la comida. La simulación se ha llevado a cabo para un tiempo de cuatro minutos, y la temperatura se muestra en grados centígrados. Para ver los resultados obtenidos se ejecutan los comandos necesarios (*Insert* → *Thermal* → *Temperature*) y se simula (*Solve*).

Después, se importarán dos gráficas realizadas en Excel, en las cuales se observa la evolución de la temperatura en función del tiempo para las diferentes frecuencias.

## CARA EN CONTACTO CON CRISTAL VITROCERÁMICO

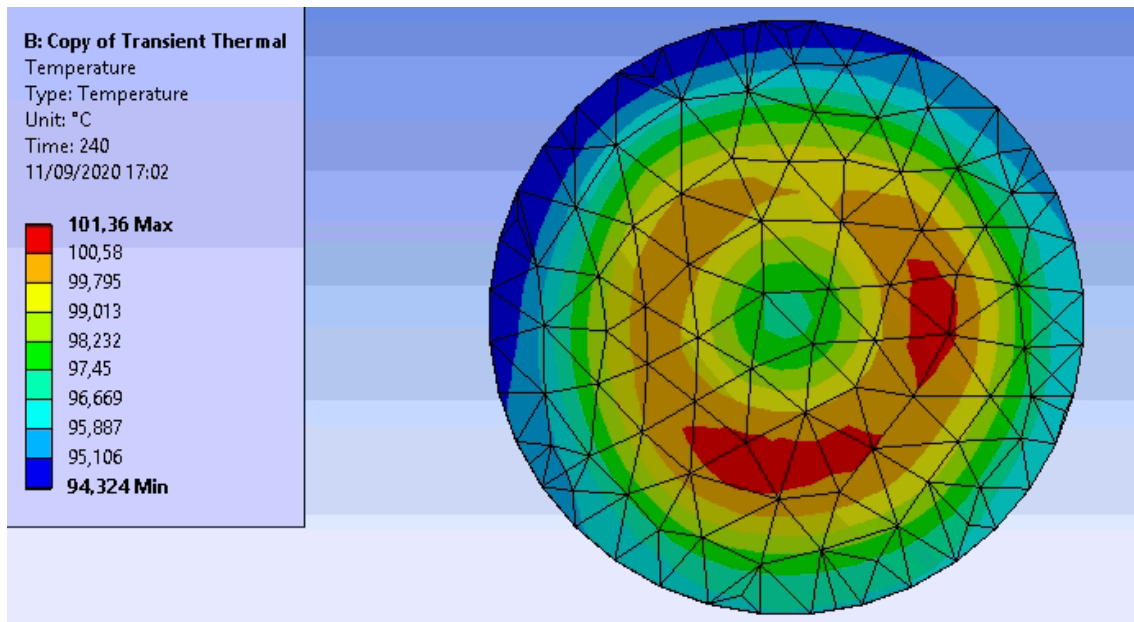


*Ilustración 79. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para **20 kHz** (Simulación en software Ansys)*

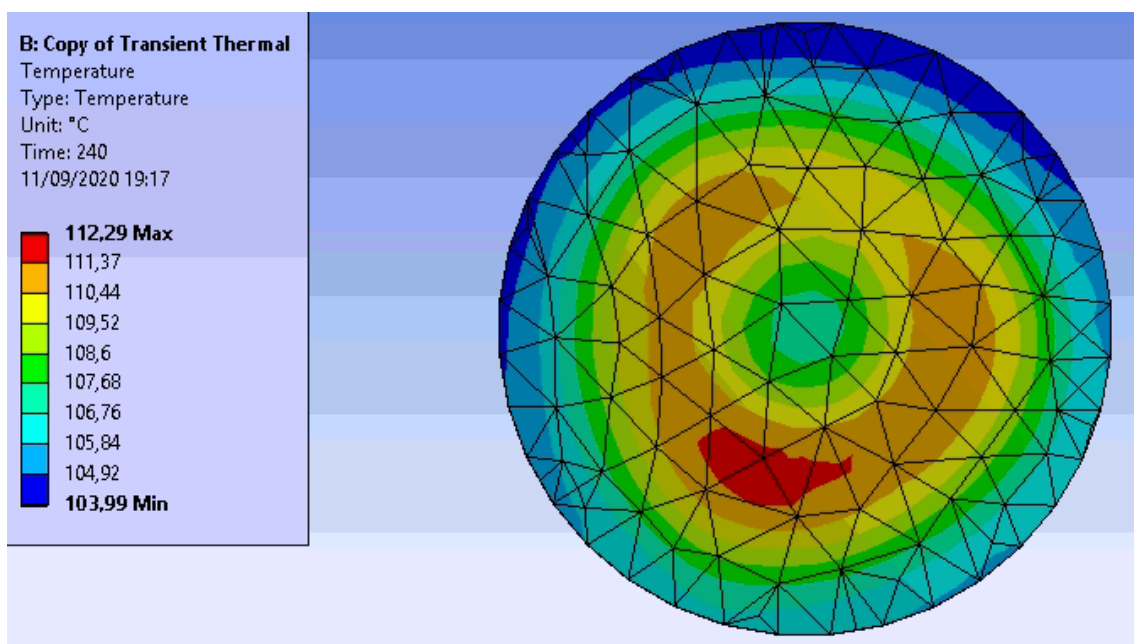


*Ilustración 80. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para **23 kHz** (Simulación en software Ansys)*

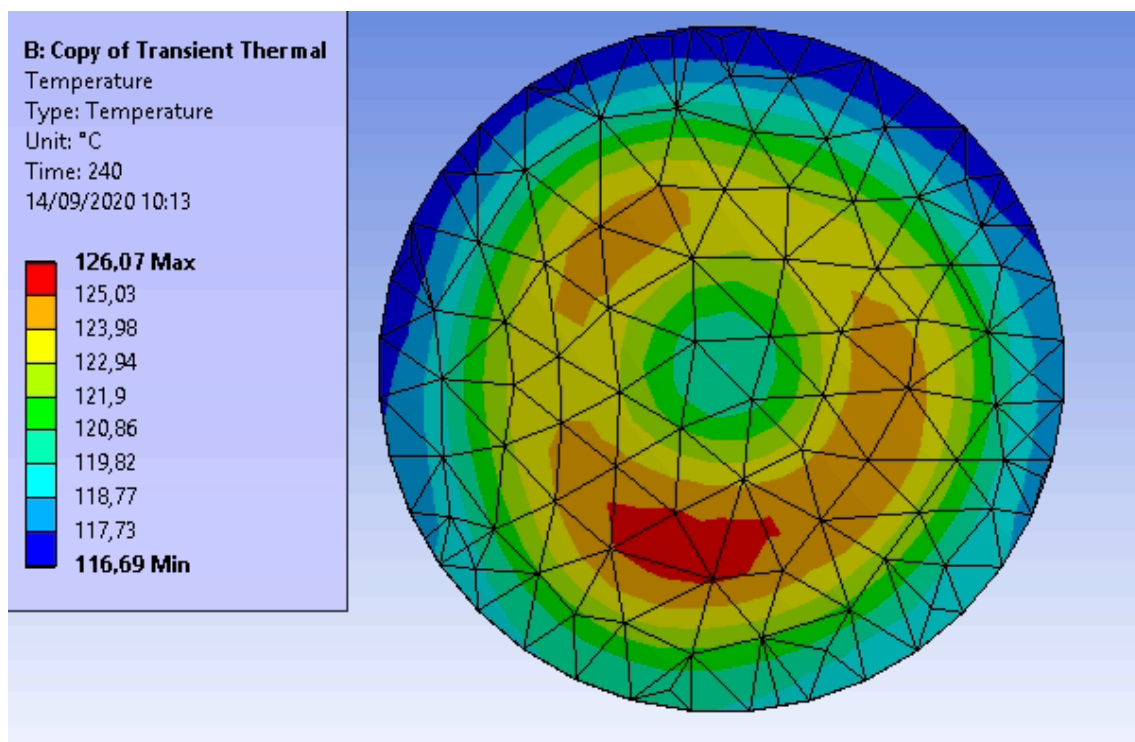




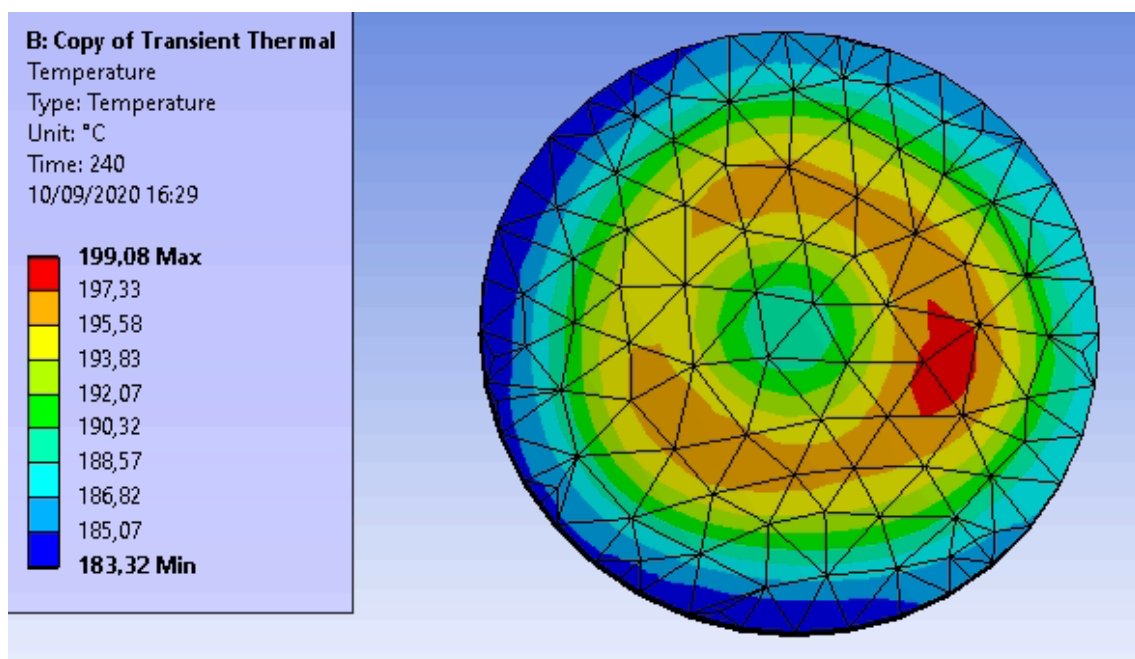
*Ilustración 81. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para **30 kHz** (Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 82. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para **40 kHz** (Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 83. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para **50 kHz** (Simulación en software Ansys)*



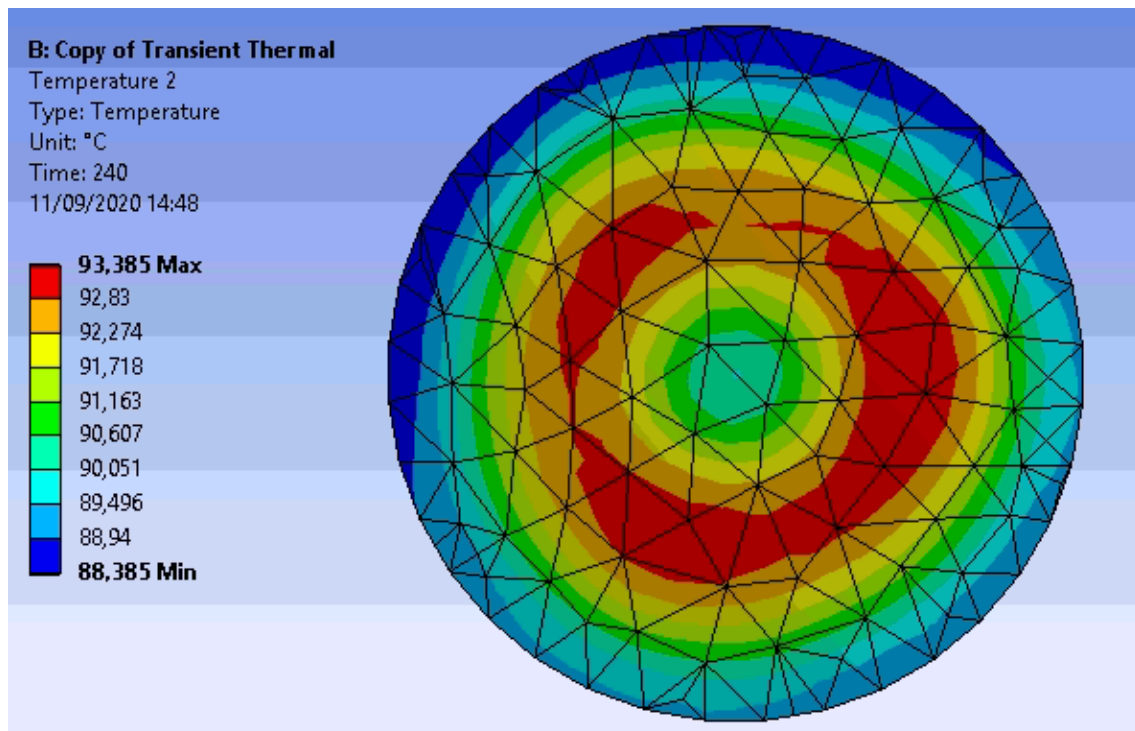
*Ilustración 84. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con el cristal vitrocerámico para **60 kHz** (Simulación en software Ansys)*

Se han representado las distribuciones de temperatura en la cara en contacto con el cristal vitrocerámico de la base del recipiente ferromagnético.

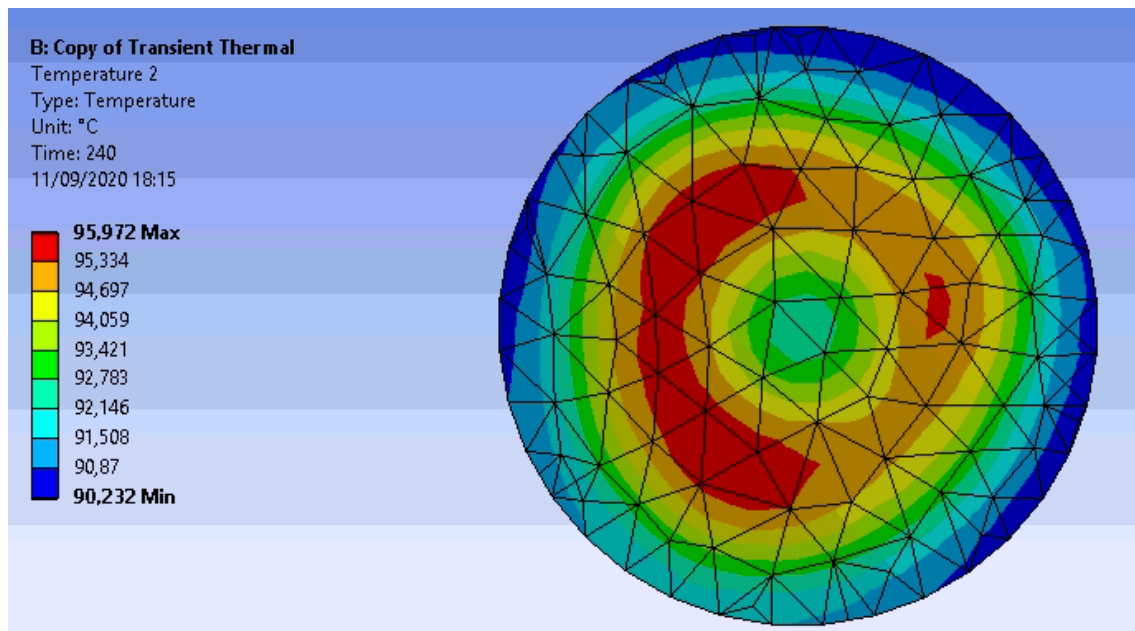
La temperatura aumenta en función de la frecuencia, y su distribución posee la forma de los parámetros anteriores de inducción magnética, densidad de corriente o pérdidas óhmicas, es decir, forma de anillo siendo mayor su valor en la línea media y disminuyendo hacia la periferia o el centro.

En esta cara, la temperatura será algo superior a la cara que se estudiará a continuación (cara en contacto con comida), esto se debe puesto que esta cara se encuentra más próxima a la bobina inductora y por lo tanto el campo magnético que incide sobre esta es más intenso.

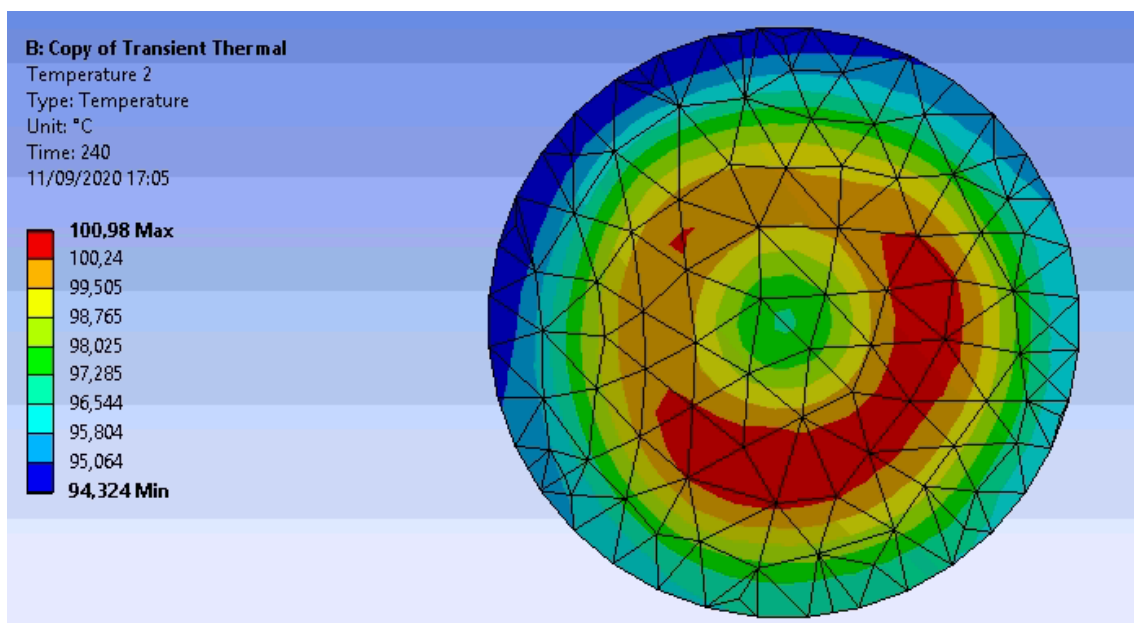
## CARA EN CONTACTO CON COMIDA



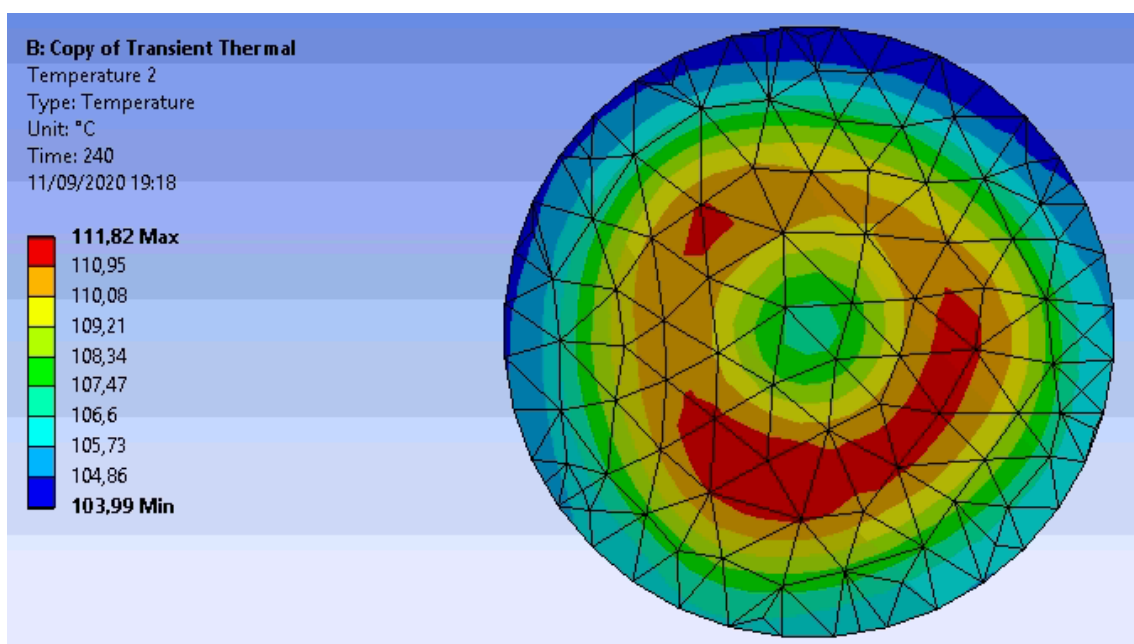
*Ilustración 85. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para 20 kHz (Simulación en software Ansys)*



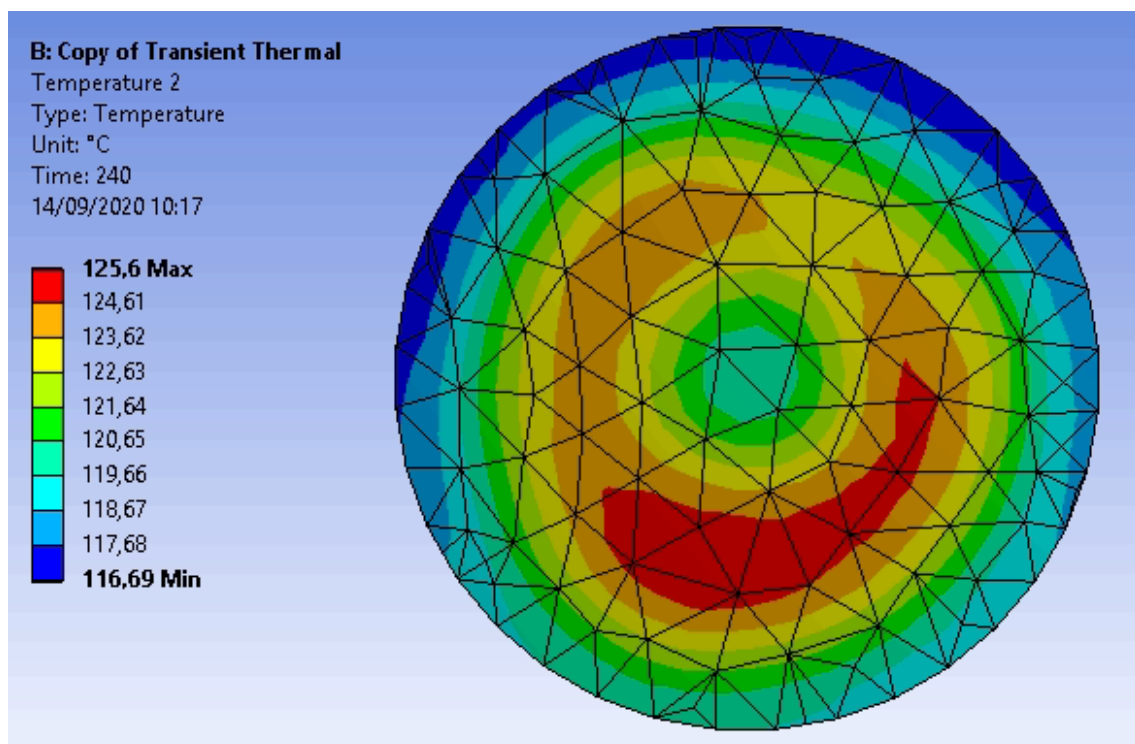
*Ilustración 86. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para 23 kHz (Simulación en software Ansys)*



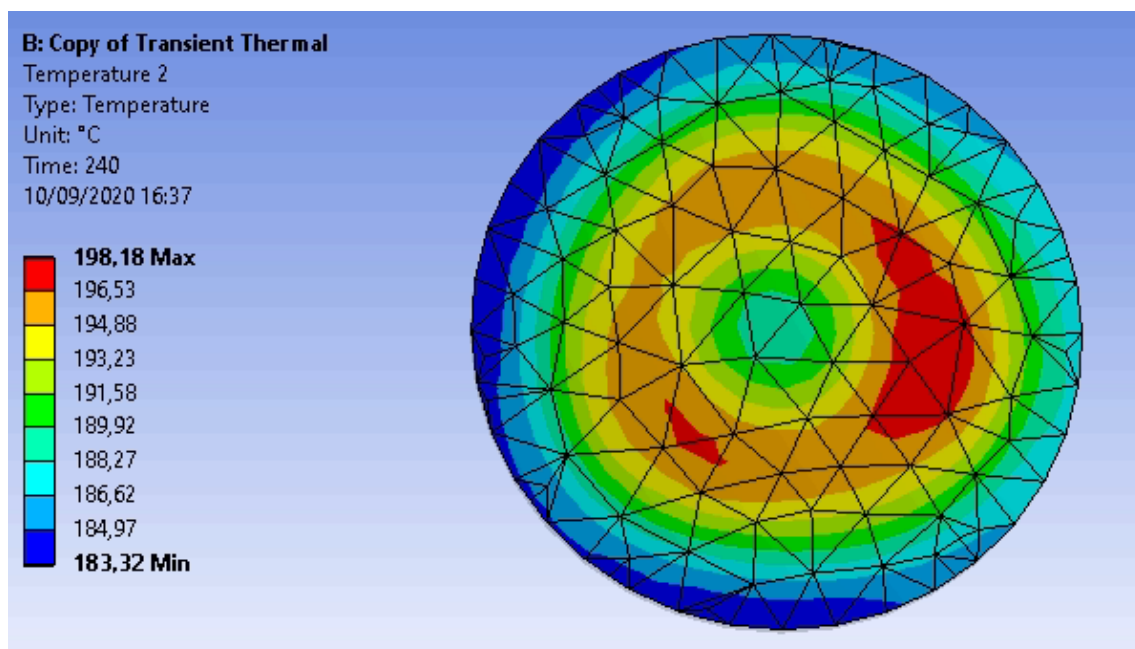
*Ilustración 87. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para **30 kHz** (Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 88. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para **40 kHz** (Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 89. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para **50 kHz** (Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 90. Distribución de temperaturas de la cara de la base del recipiente ferromagnético en contacto con la comida para **60 kHz** (Simulación en software Ansys)*

Se han representado las distribuciones de temperatura en la cara en contacto con la comida de la base del recipiente ferromagnético.

De igual modo que en el caso anterior, la distribución de la temperatura posee forma de anillo, siendo mayor en su línea media y disminuyendo hacia la periferia o el centro. Y, como ya se explicó, en esta cara la temperatura será algo inferior debido a que se encuentra más alejada que la cara que está en contacto con el cristal vitrocerámico.



## TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Se procede a representar las gráficas de temperatura en función del tiempo para las dos caras de la base del recipiente ferromagnético. Se puede observar como la temperatura asciende prácticamente lineal en función del tiempo, y que la pendiente es mayor cuanto mayor es la frecuencia.

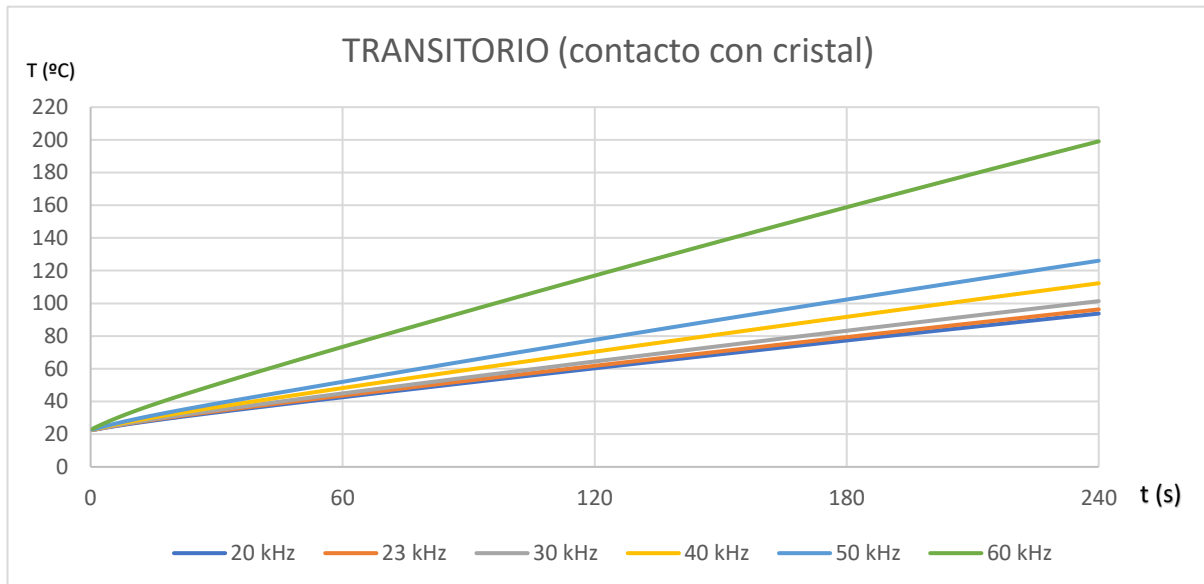


Ilustración 91. Temperaturas en función del tiempo para las distintas frecuencias (Gráfica importada de Excel)

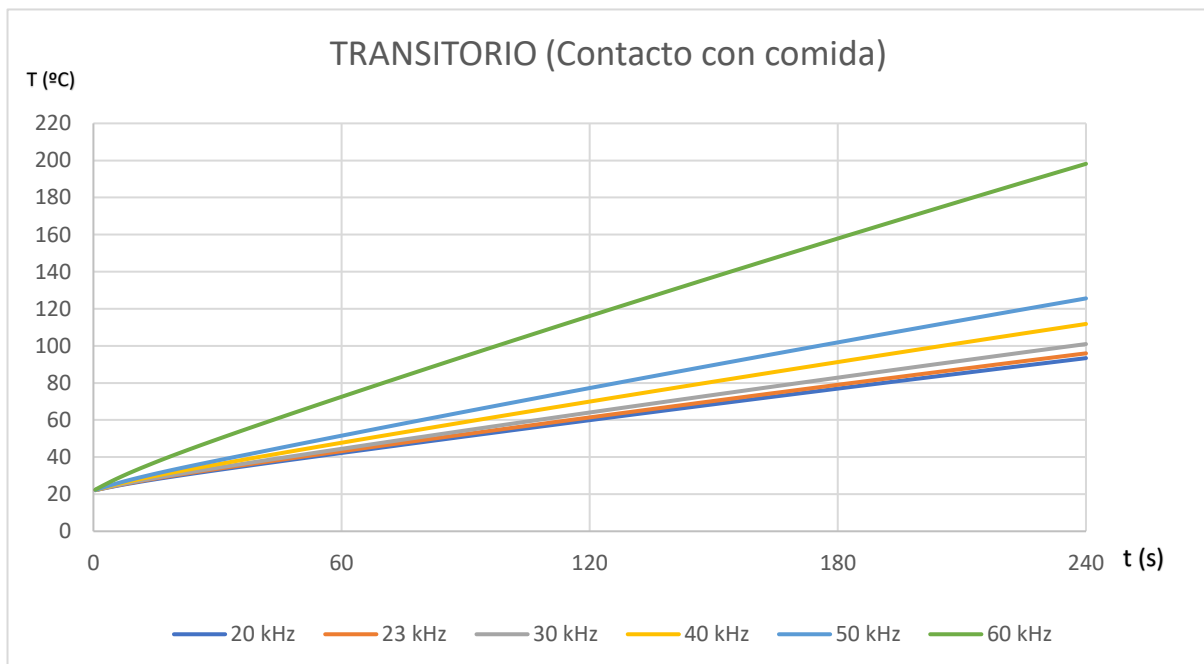


Ilustración 92. Temperaturas en función del tiempo para las distintas frecuencias (Gráfica importada de Excel)



### 10.3 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Para la realización de este proyecto, como ya se comentó anteriormente, se ha estado trabajando en colaboración con la empresa TEKA, luego los datos de partida fueron proporcionados por ellos. Para la validación de los resultados obtenidos, lo ideal hubiese sido comparar estos con ensayos reales que realizase la empresa. Debido al Covid-19, la coordinación con dicha empresa fue más complicada y no se pudo realizar dichos ensayos. No obstante, se puede verificar que los datos obtenidos son coherentes atendiendo a dos vías distintas:

El primer razonamiento, sería atendiendo al cálculo analítico, puesto que partiendo de los valores proporcionados por la empresa se pudo obtener los valores de inducción magnética para las distintas frecuencias. Posteriormente, se comprobó que los valores obtenidos eran del orden de los valores obtenidos en las distribuciones que se consiguieron en la simulación.

El segundo razonamiento, sería atendiendo a los valores de temperatura. Se buscó información y se contactó con la empresa para saber en que valores de temperatura trabaja una cocina de inducción. Una vez realizada la simulación, y al comprobar que los valores de temperatura obtenidos en esta se encuentran en el rango de temperaturas que trabaja una cocina, se puede afirmar que la simulación se ha desarrollado correctamente.

## **10.4 MODIFICACIONES EN EL DISEÑO**

En este apartado se han realizado unas modificaciones en el diseño y se ha analizado como varían los parámetros anteriormente estudiados debido a dichas modificaciones. Se estudiarán cuatro casos diferentes, que se pueden clasificar en dos grupos: modificaciones en el espesor del cristal vitrocerámico y modificaciones en el diámetro del recipiente ferromagnético.

### **10.4.1 MODIFICACIÓN EN EL ESPESOR DEL CRISTAL VITROCERÁMICO**

El espesor original del cristal vitrocerámico del diseño es de 5 mm, se va a estudiar cómo varían los parámetros estudiados anteriormente si se varía dicho espesor dos milímetros. Luego tendremos dos casos: espesor de 3 mm y espesor de 7 mm. Se estudiarán para la frecuencia de 23 kHz, y después se compararán los resultados con los del diseño original para la misma frecuencia.

Para realizar dicha modificación en la simulación, se tuvo que modificar la geometría desde la simulación electromagnética. Se modificó el espesor y la posición de la base del recipiente ferromagnético, ya que al variar el espesor se descolocó la base del recipiente y se tuvo que colocar de nuevo encima del cristal. Se guardó y se simuló, obteniendo las distribuciones de los parámetros electromagnéticos. Posteriormente, para seguir con la simulación térmica se actualizó el diseño desde la página principal, y una vez dentro de la simulación térmica, se importó la generación de calor, ya que al modificar el diseño esta varía. Se guardó y se simuló, obteniéndose los valores térmicos.

Por último, se llevaron los datos de la simulación térmica a un Excel para generar unas gráficas comparativas del transitorio de la temperatura en función del tiempo para los diferentes espesores.

## INDUCCIÓN MAGNÉTICA (B)

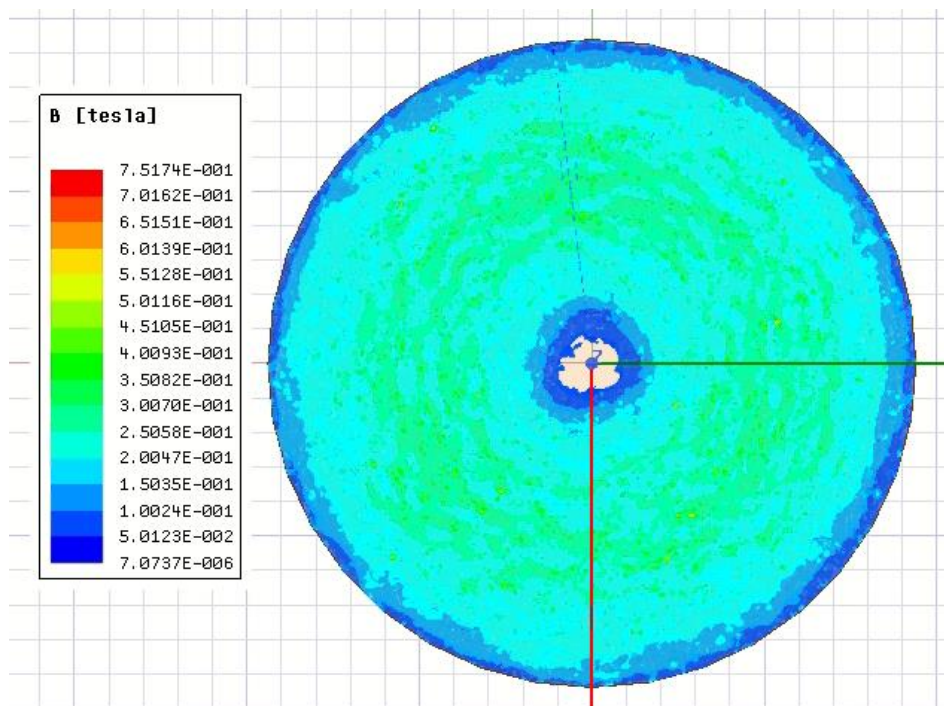


Ilustración 93. Distribución de la inducción magnética para un espesor de **3 mm** (Simulación en software Ansys)

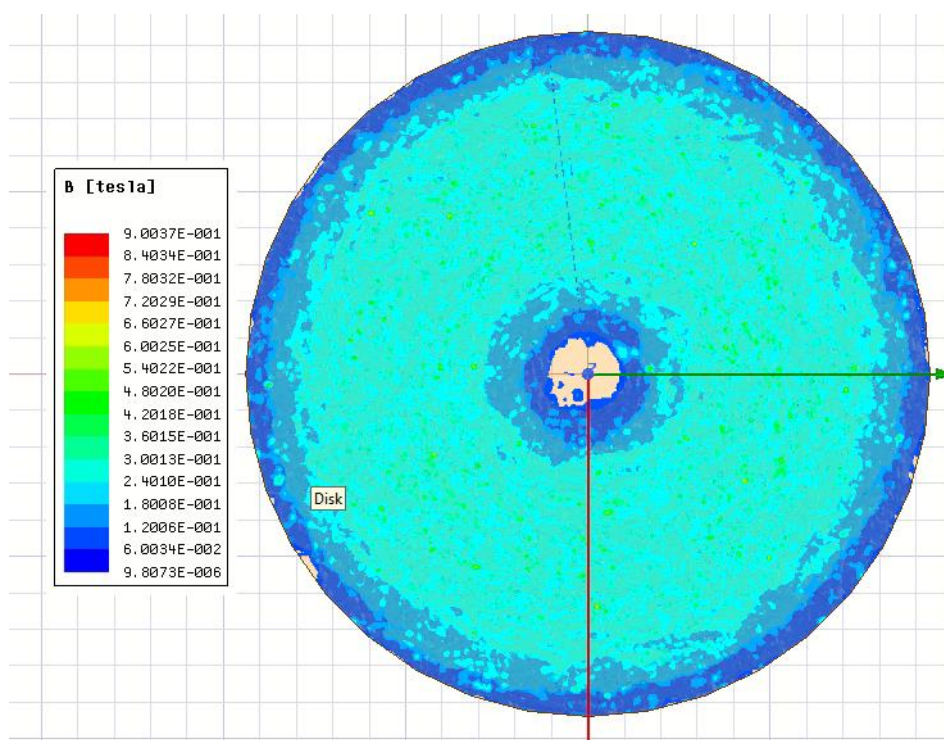
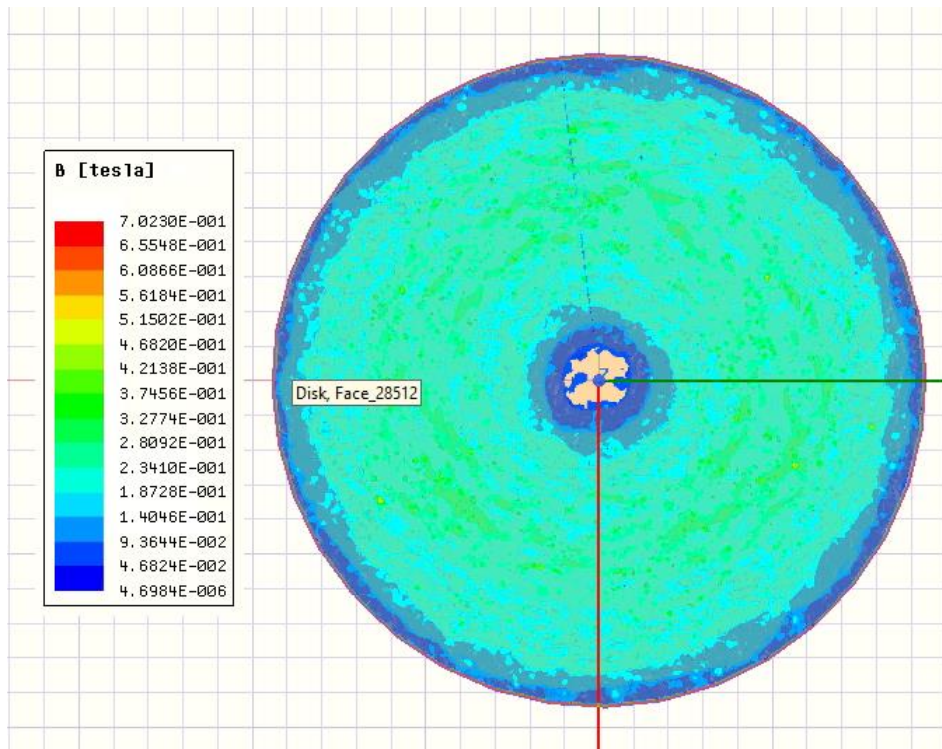


Ilustración 94. Distribución de la inducción magnética para un espesor de **5 mm** (Simulación en software Ansys)



*Ilustración 95. Distribución de la inducción magnética para un espesor de **7 mm** (Simulación en software Ansys)*

Se observa a partir de las ilustraciones mostradas que cuanto menor es el espesor del cristal vitrocerámico más próximo de la bobina inductora se encuentra, y por lo tanto, mayor es la inducción electromagnética. El cristal vitrocerámico tiene función de soporte del recipiente en el que se va a cocinar y de protección de los elementos internos que componen la placa de inducción. Esto implica que cuanto mayor espesor posea más consistente será y mejor realizará dichas funciones, en contraposición, cuanto menor sea su espesor mayor temperatura le llegará a la base del recipiente en el que se quiere cocinar. Esto originará que se tenga que buscar una solución de compromiso, es decir, un espesor óptimo que satisfaga ambas necesidades de la mejor manera posible.

## CAMPO MAGNÉTICO (H)

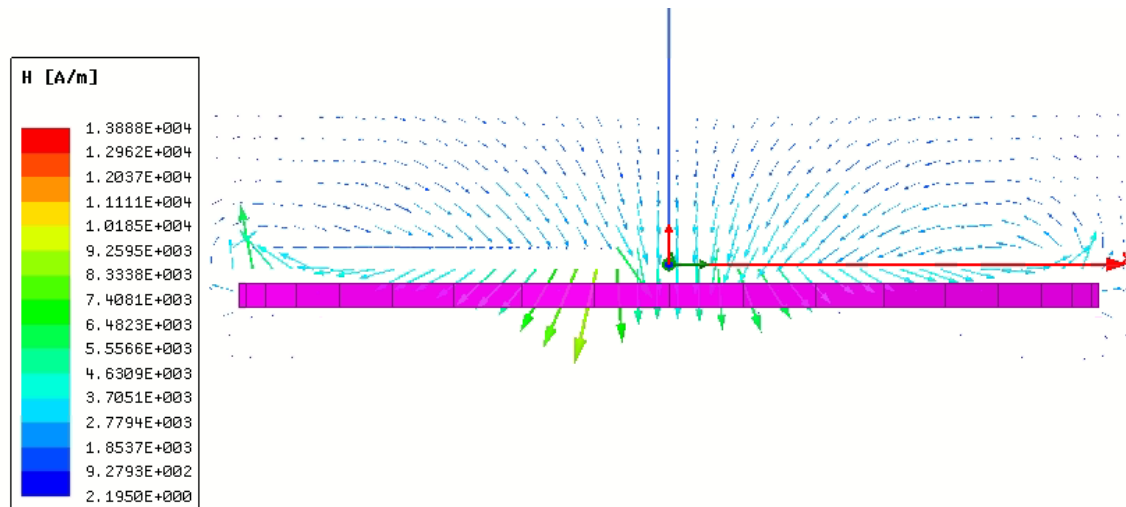


Ilustración 96. Distribución de las líneas de campo magnético para un espesor de **3 mm**  
(Simulación en software Ansys)

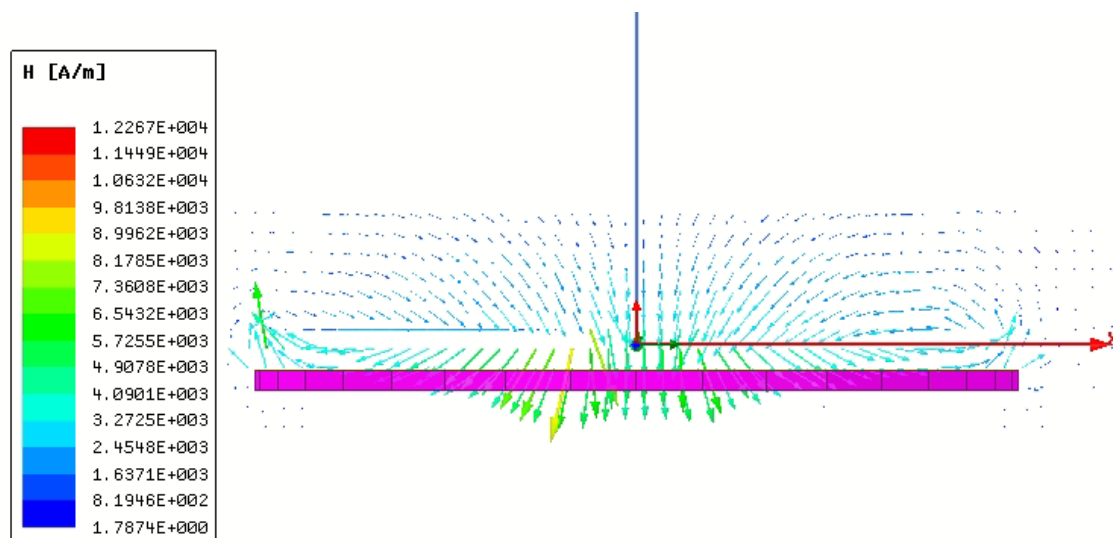
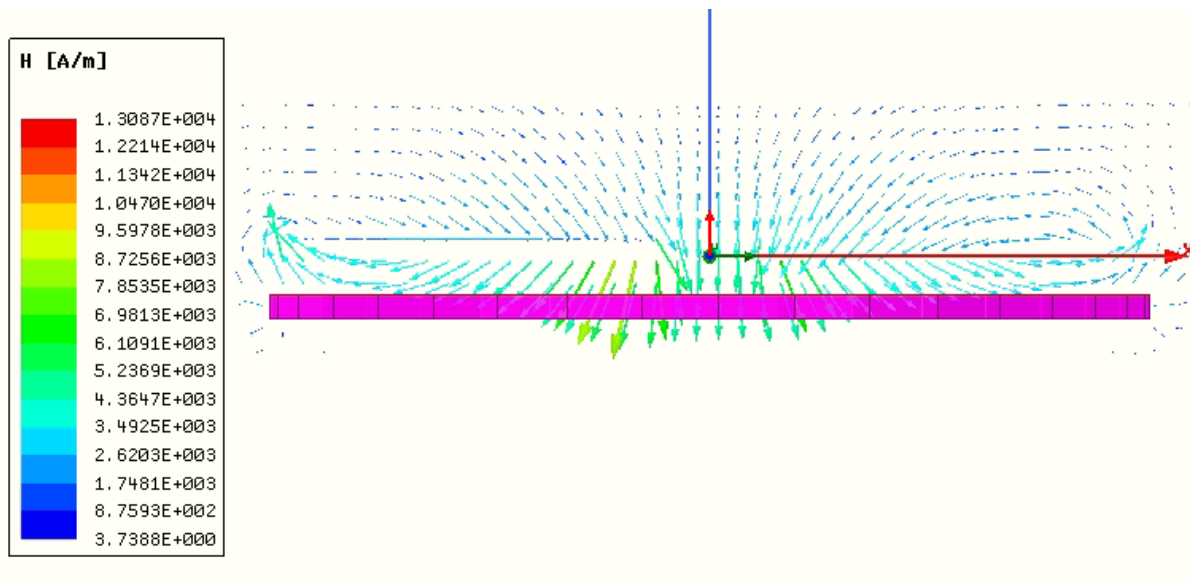


Ilustración 97. Distribución de las líneas de campo magnético para un espesor de **5 mm**  
(Simulación en software Ansys)

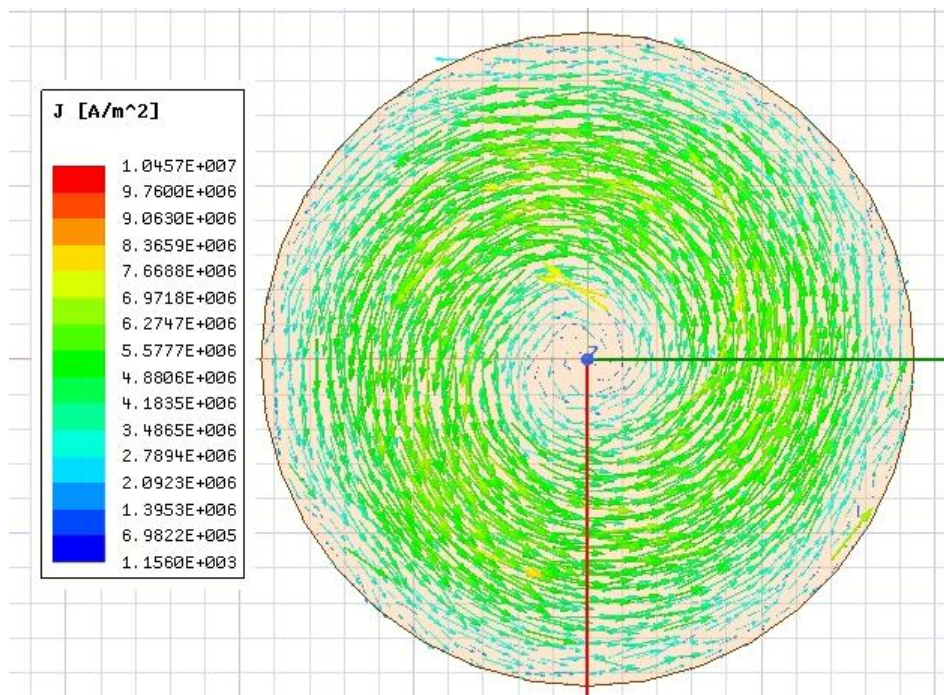


*Ilustración 98. Distribución de las líneas de campo magnético para un espesor de **7 mm**  
(Simulación en software Ansys)*

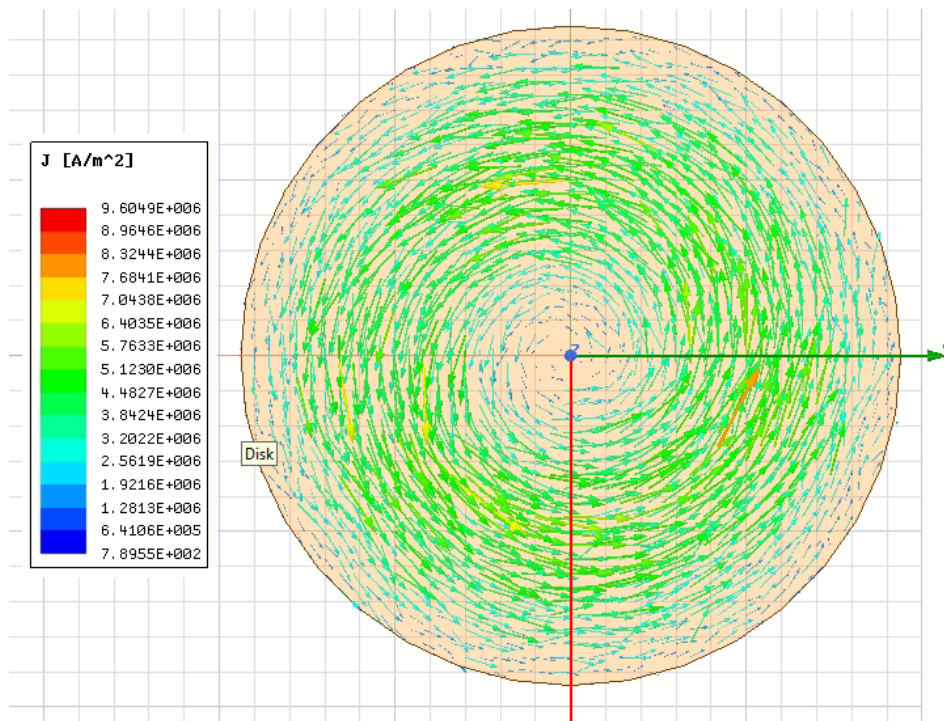
De igual manera que ocurre en la inducción magnética, cuanto menor espesor tenga el cristal vitrocerámico, más próxima se encontrará la bobina inductora de la base del recipiente ferromagnético, por lo tanto más líneas de campo atravesarán dicha superficie y con mayor intensidad.



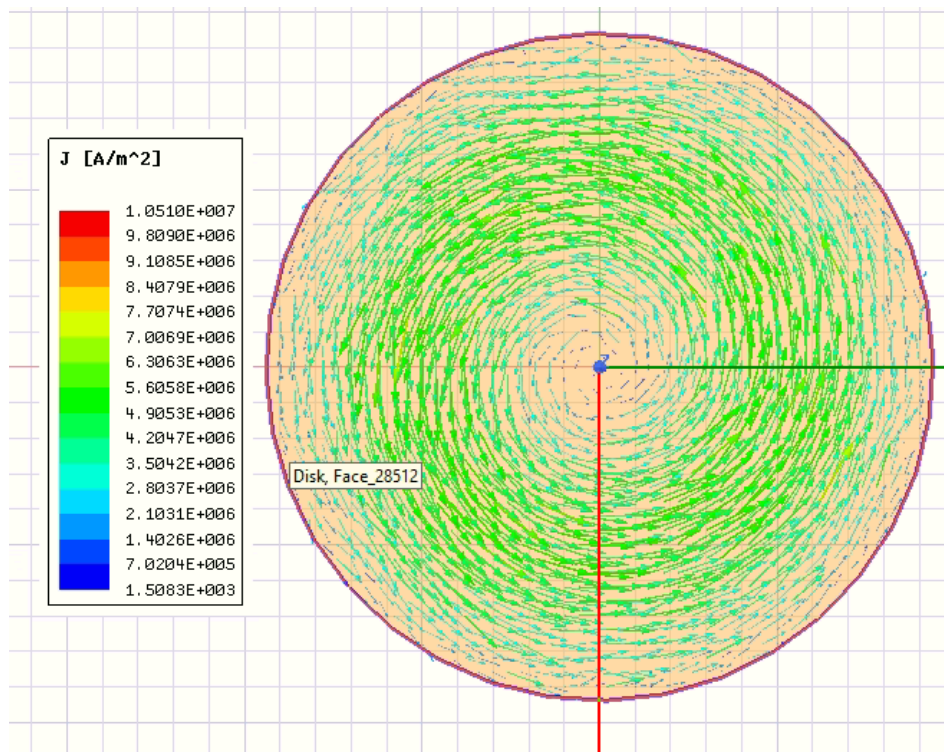
## DENSIDAD DE CORRIENTE (J)



*Ilustración 99. Distribución de la densidad de corriente para un espesor de **3 mm**  
(Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 100. Distribución de la densidad de corriente para un espesor de **5 mm**  
(Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 101. Distribución de la densidad de corriente para un espesor de **7 mm**  
(Simulación en software Ansys)*

Se observa que cuanto menor espesor mayor será la intensidad de las corrientes que circulen en la base del recipiente ferromagnético.



## PÉRDIDAS ÓHMICAS

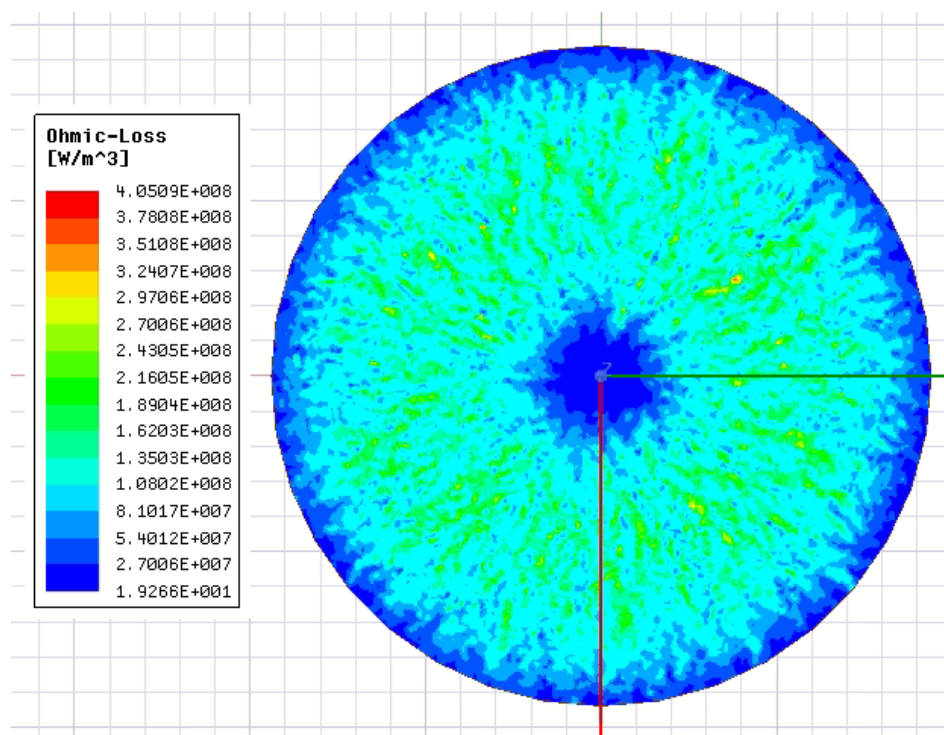


Ilustración 102. Distribución de las pérdidas óhmicas para un espesor de **3 mm**  
(Simulación en software Ansys)

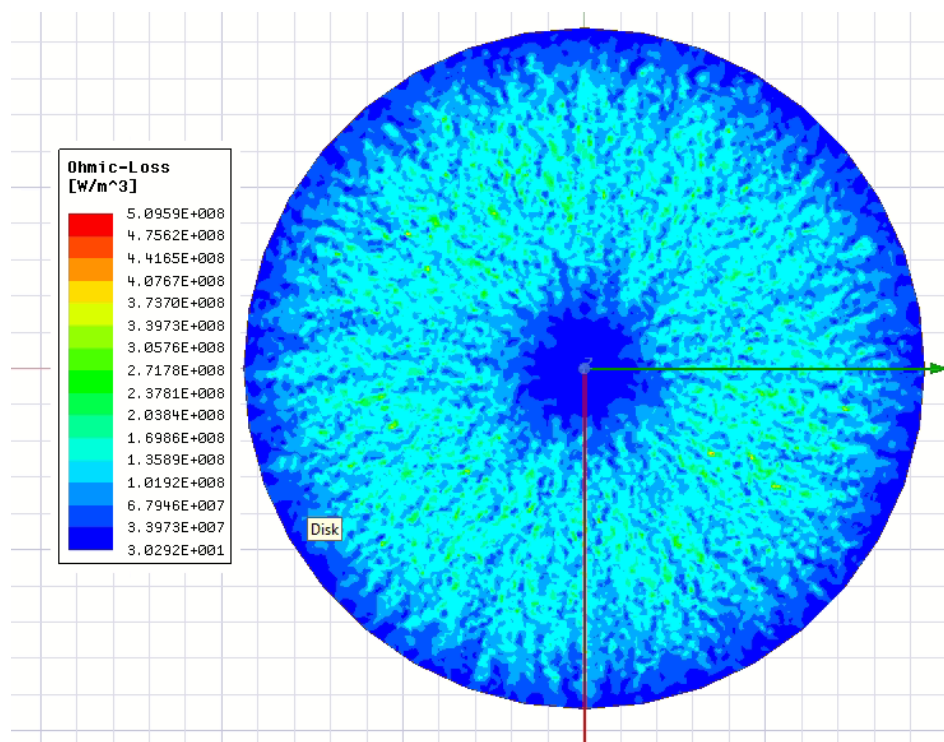
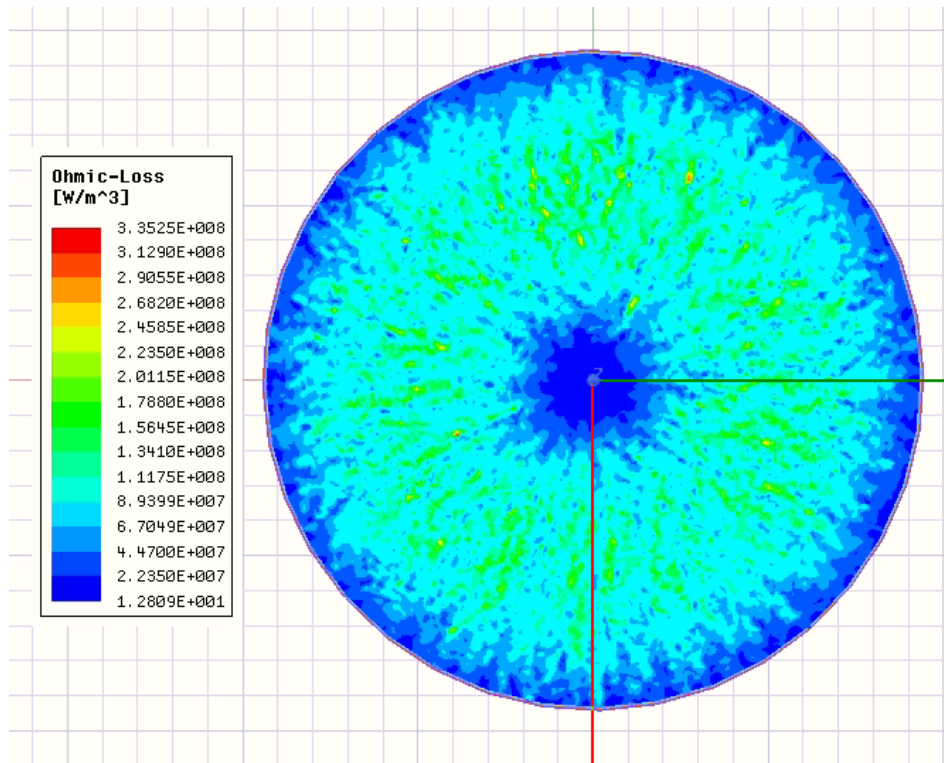


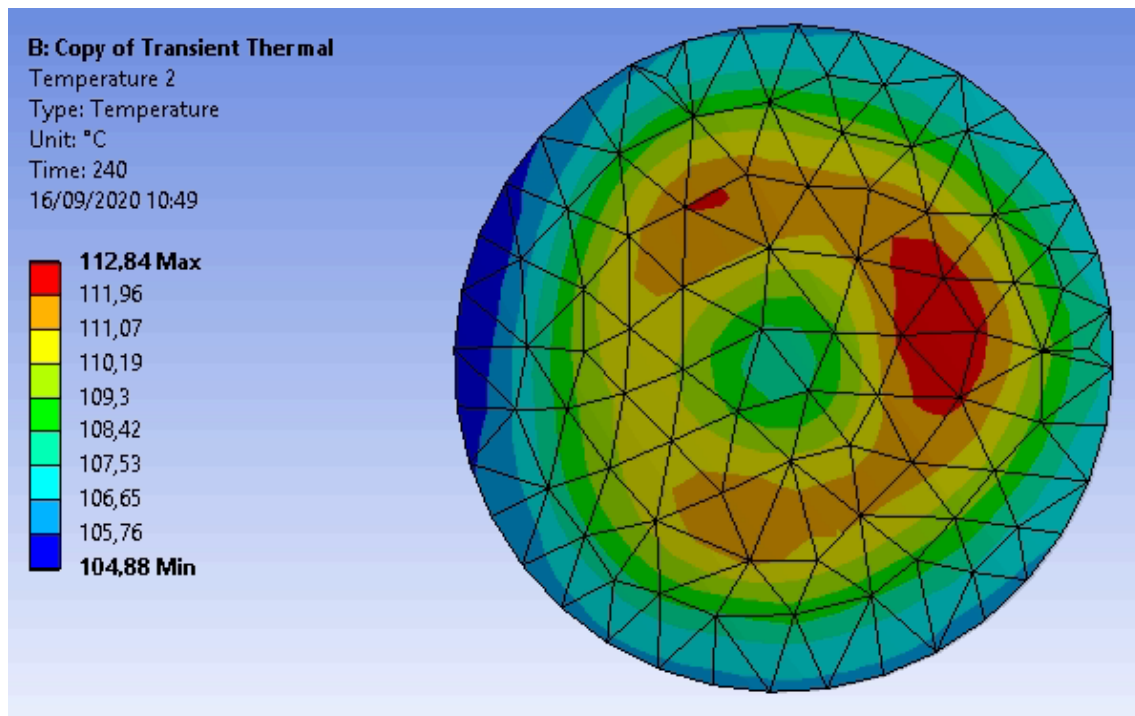
Ilustración 103. Distribución de las pérdidas óhmicas para un espesor de **5 mm**  
(Simulación en software Ansys)



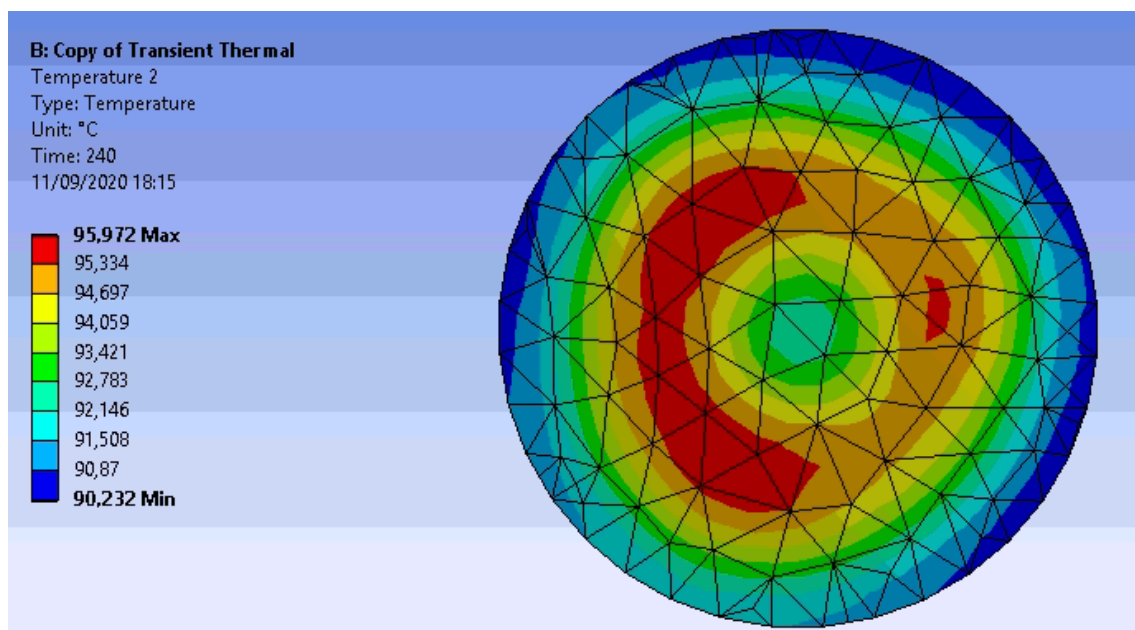
*Ilustración 104. Distribución de las pérdidas óhmicas para un espesor de **7 mm**  
(Simulación en software Ansys)*

Al disminuir el espesor las corrientes aumentan, y al aumentar las corrientes aumentan las pérdidas óhmicas. En conclusión, cuanto menor espesor mayores son las pérdidas óhmicas.

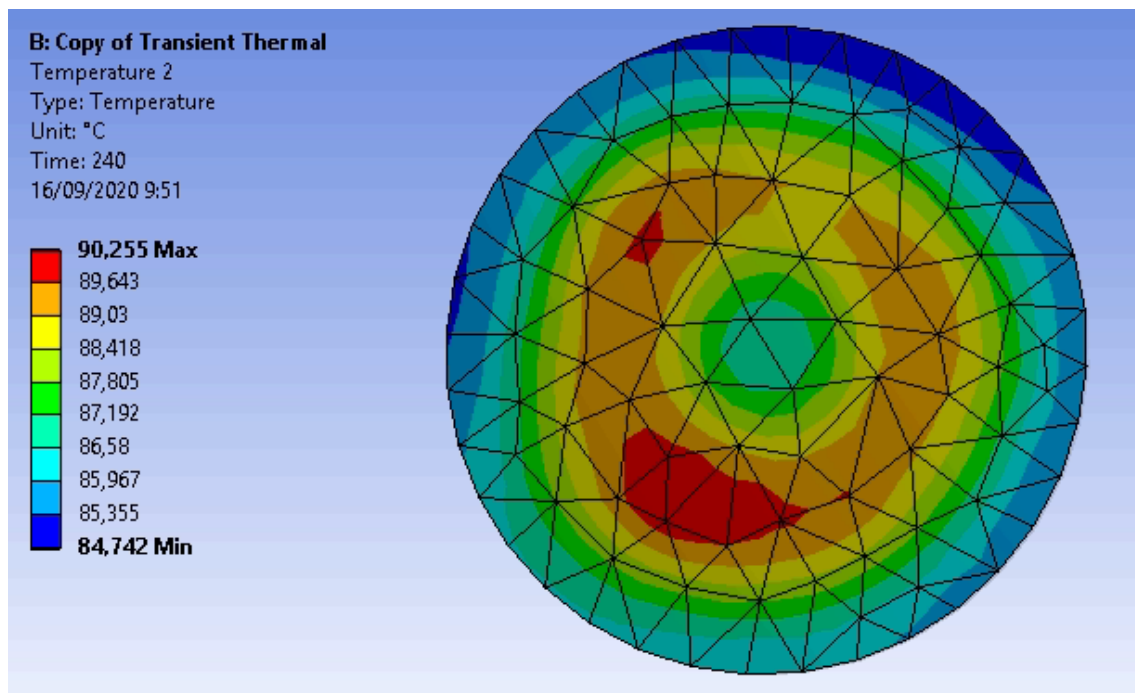
## TEMPERATURA EN LA CARA EN CONTACTO CON COMIDA



*Ilustración 105. Distribución de la temperatura para un espesor de **3 mm**  
(Simulación en software Ansys)*



*Ilustración 106. Distribución de la temperatura para un espesor de **5 mm**  
(Simulación en software Ansys)*

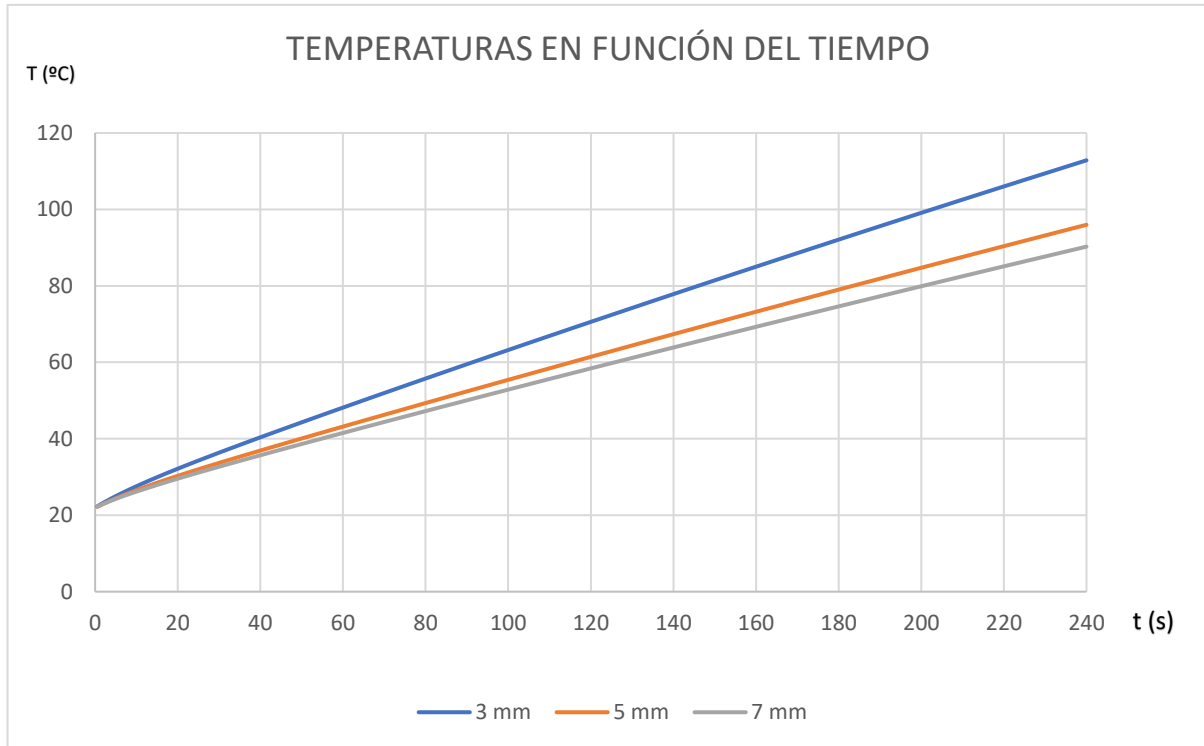


*Ilustración 107. Distribución de la temperatura para un espesor de **7 mm**  
(Simulación en software Ansys)*

Se observa en las imágenes que cuanto menor es el espesor mayor son las temperaturas alcanzadas en la base del recipiente ferromagnético.

## TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Se importa de Excel una gráfica que muestra como aumenta la temperatura en función del tiempo para los distintos espesores del cristal vitrocerámico.



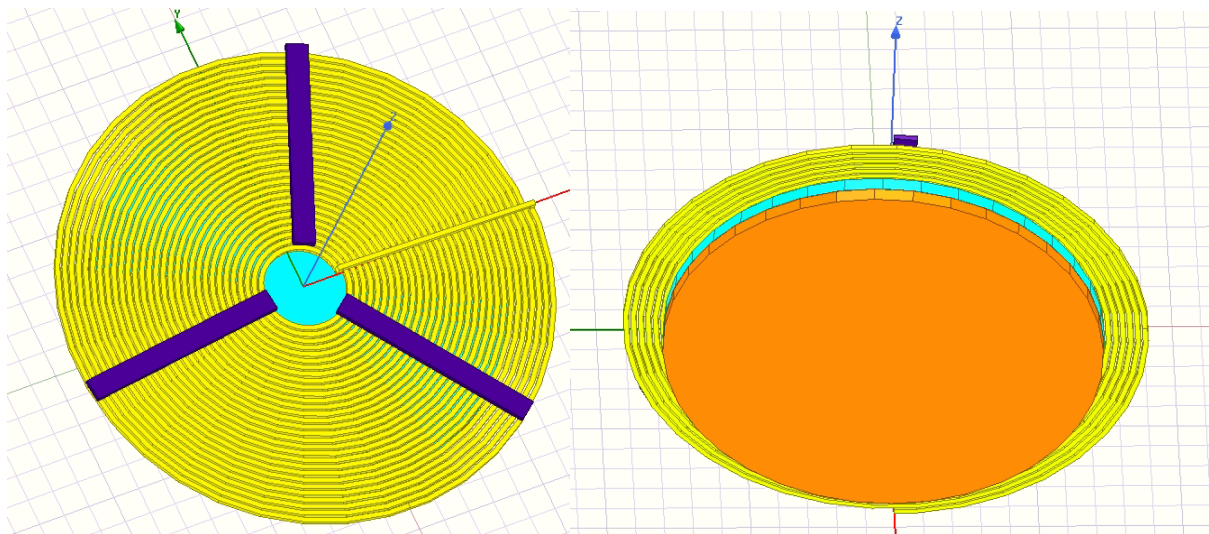
*Ilustración 108. Gráfica de temperatura en función del tiempo para los diferentes espesores (Gráfica importada de Excel)*

En el eje de abscisas se sitúa el tiempo en segundos y en el de ordenadas la temperatura en grados centígrados, se ha desarrollado la simulación para un tiempo de 4 minutos.

#### 10.4.2 MODIFICACIÓN EL DIÁMETRO DEL RECIPIENTE FERROMAGNÉTICO

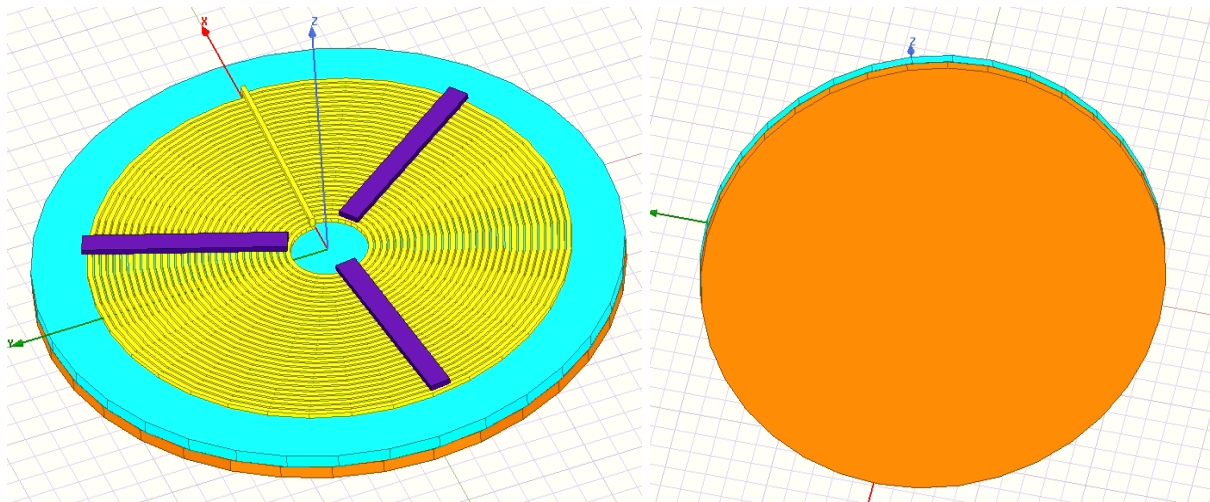
El diámetro original del recipiente ferromagnético es de 185 mm, se va a estudiar cómo varían los parámetros estudiados anteriormente si se varía dicho diámetro junto con el cristal vitrocerámico 35 mm, permaneciendo fijo las dimensiones de la bobina. Luego tendremos dos casos: diámetro de 150 mm y diámetro de 220 mm. Se estudiarán para la frecuencia de 23 kHz, y después se compararán los resultados con los del diseño original para la misma frecuencia.

Para realizar dicha modificación en la simulación, se actuó de un modo similar a la modificación del espesor del cristal vitrocerámico. Se tuvo que modificar la geometría desde la simulación electromagnética. Se modificó el diámetro de la base del recipiente ferromagnético y del cristal vitrocerámico, ya que es lógico que dicho cristal sea como mínimo igual que el recipiente. A continuación, se muestra como quedan los diseños con sus respectivas modificaciones:



*Ilustración 109. Vista superior e inferior del diseño para un diámetro de la base del recipiente de **150 mm** (Simulación en software Ansys)*





*Ilustración 110. Vista superior e inferior del diseño para un diámetro de la base del recipiente de **220 mm** (Simulación en software Ansys)*

Siendo el disco naranja la base del recipiente ferromagnético, el disco azul el cristal vitrocerámico, la espiral amarilla la bobina inductora y los rectángulos morados las ferritas.

Se guardó y se simuló, obteniendo las distribuciones de los parámetros electromagnéticos. Posteriormente, para seguir con la simulación térmica se actualizó el diseño desde la página principal, y una vez dentro de la simulación térmica, se importó la generación de calor, ya que al modificar el diseño esta varía. Se guardó y se simuló, obteniéndose los valores térmicos.

Por último, se llevaron los datos de la simulación térmica a un Excel para generar unas gráficas comparativas del transitorio de la temperatura en función del tiempo para los diferentes diámetros.

## INDUCCIÓN MAGNÉTICA (B)

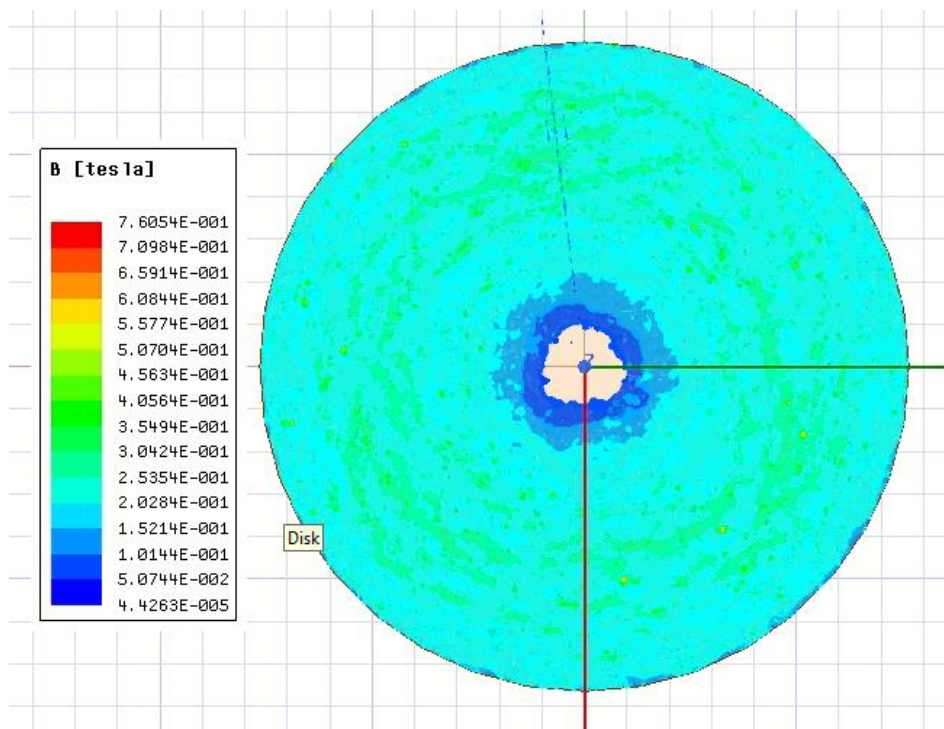


Ilustración 111. Distribución de la inducción magnética para un diámetro de **150 mm**  
(Simulación en software Ansys)

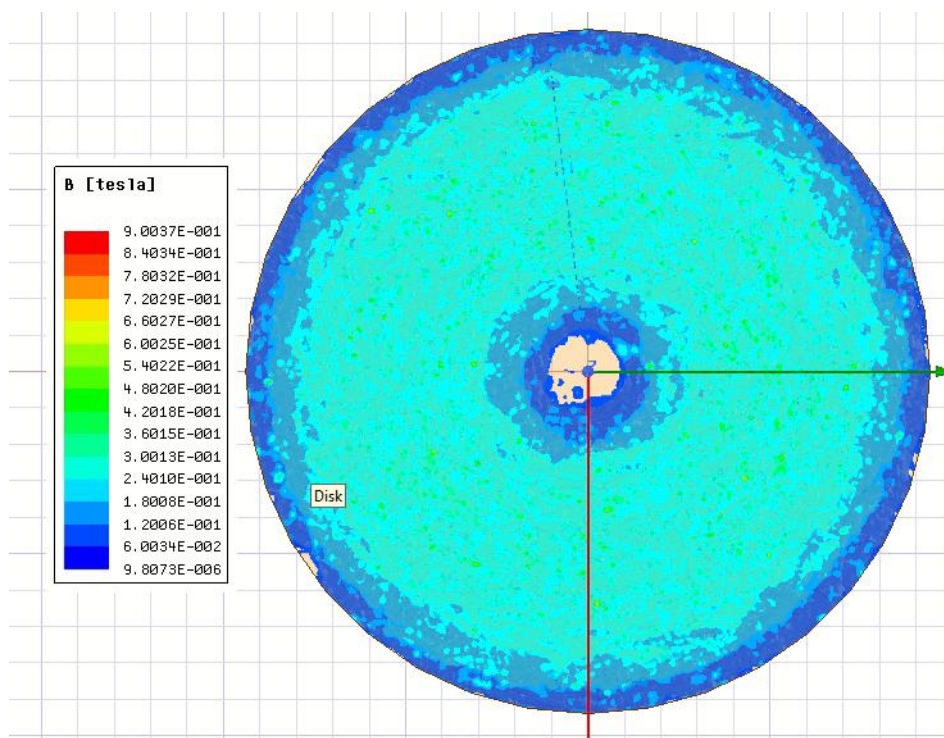
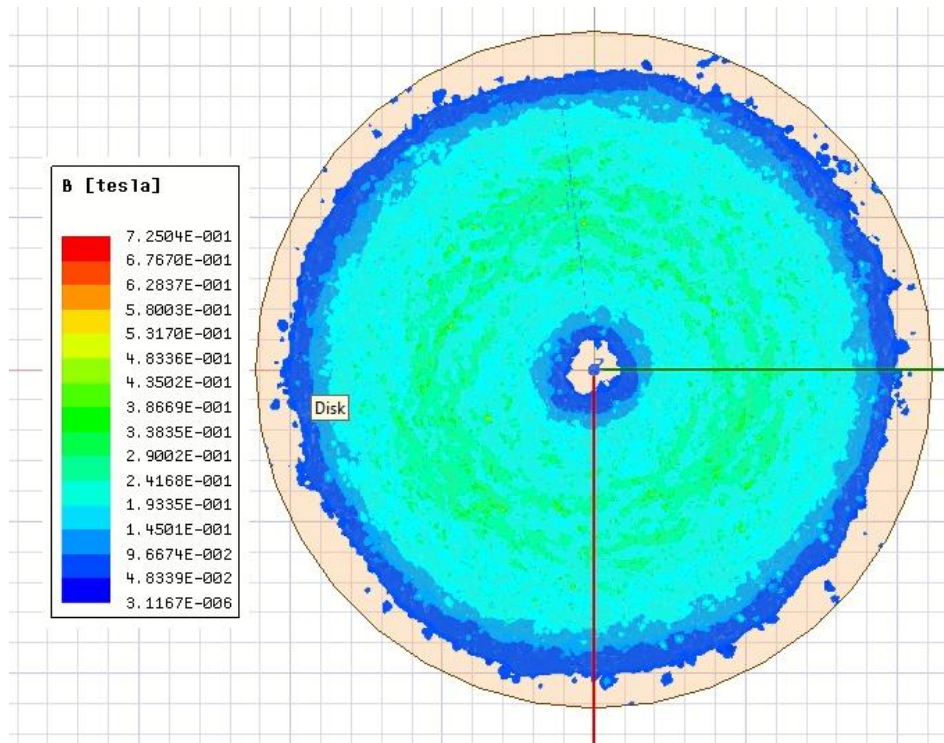


Ilustración 112. Distribución de la inducción magnética para un diámetro de **185 mm**  
(Simulación en software Ansys)





*Ilustración 113. Distribución de la inducción magnética para un diámetro de **220 mm**  
(Simulación en software Ansys)*

En este caso, sólo se han modificado el diámetro del recipiente ferromagnético y el diámetro del cristal vitrocerámico, el diámetro de la bobina inductora no. Para el diámetro de 150 mm, se observa que se desaprovecha parte de la inducción magnética, pues la base del recipiente no abarca toda la inducción que la bobina genera. Para el diámetro de 220 mm, se observa que la bobina no genera tanta inducción magnética como para cubrir toda la base del recipiente, esto conlleva a que la periferia y el centro de la base del recipiente no se vayan a calentar. En conclusión, el caso correcto es el de diámetro 185 mm, y se entiende en este estudio por qué la bobina inductora debe ser del mismo diámetro que la base del recipiente.

## CAMPO MAGNÉTICO (H)

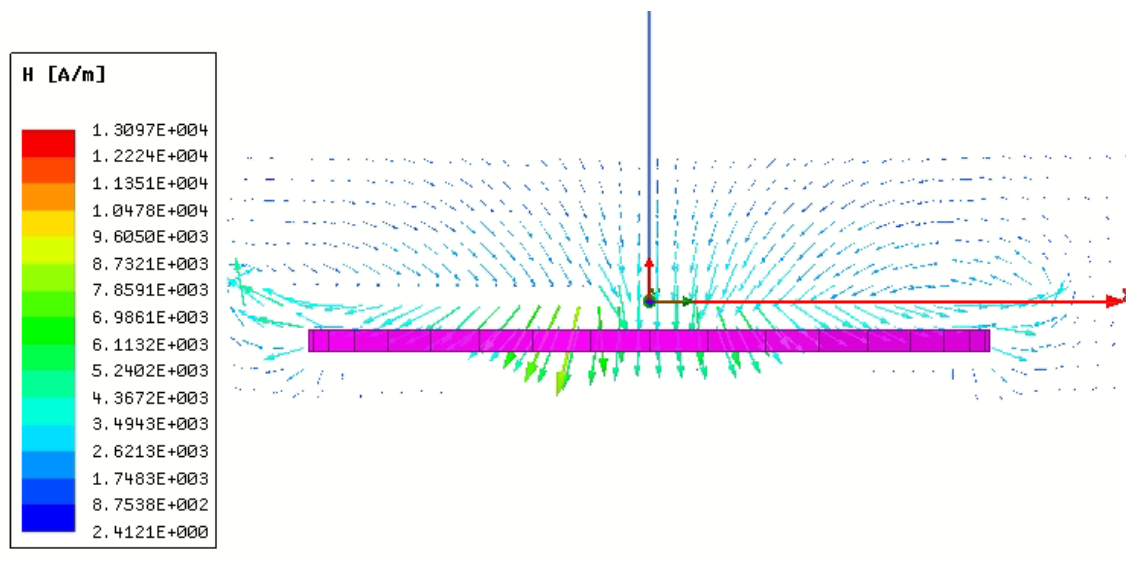


Ilustración 114. Distribución de las líneas de campo magnético para un diámetro de **150 mm**  
(Simulación en software Ansys)

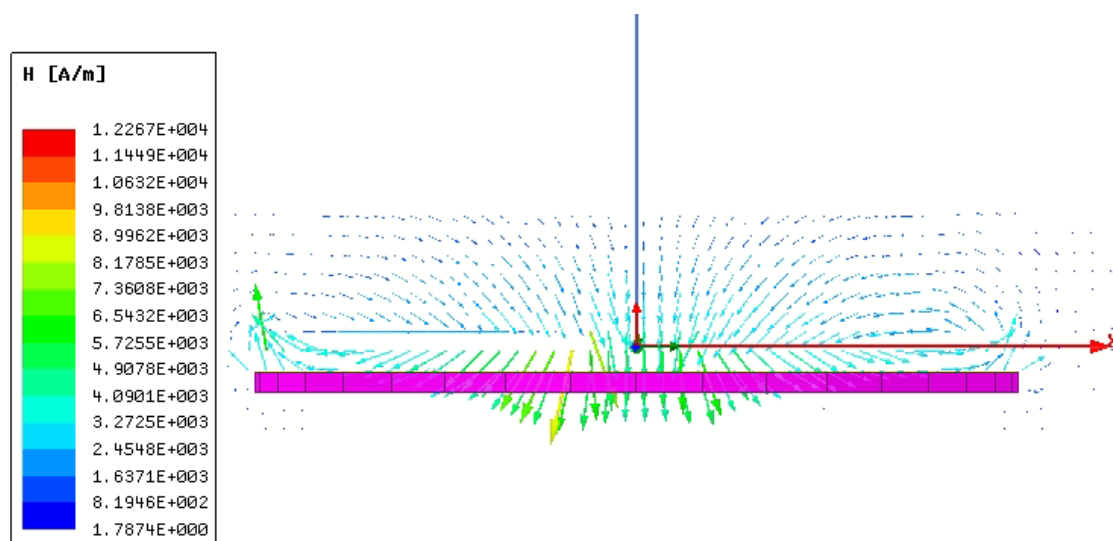
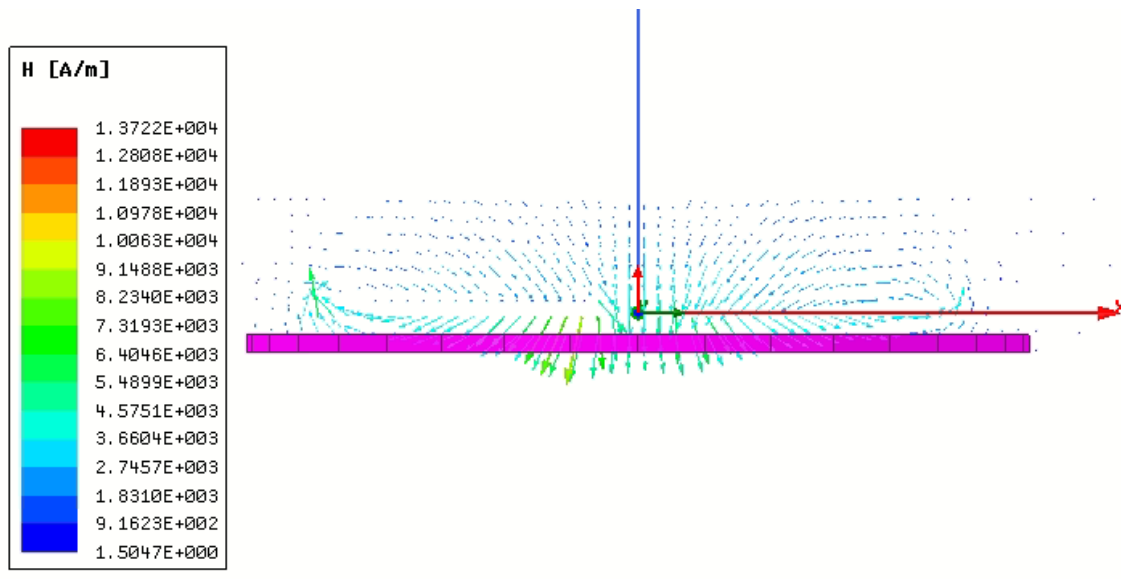


Ilustración 115. Distribución de las líneas de campo magnético para un diámetro de **185 mm**  
(Simulación en software Ansys)



*Ilustración 116. Distribución de las líneas de campo magnético para un diámetro de **220 mm** (Simulación en software Ansys)*

Analizando las distribuciones de las líneas de campo magnético se llega a las mismas conclusiones que se obtuvieron al analizar las distribuciones de inducción magnética. Para el caso de diámetro de 150 mm, se está desperdiciando parte del campo magnético generado. Para el caso de diámetro de 220 mm, las líneas del campo magnético no atraviesan la total superficie de la base por lo que la generación de calor no actuará en toda ella.

## DENSIDAD DE CORRIENTE (J)

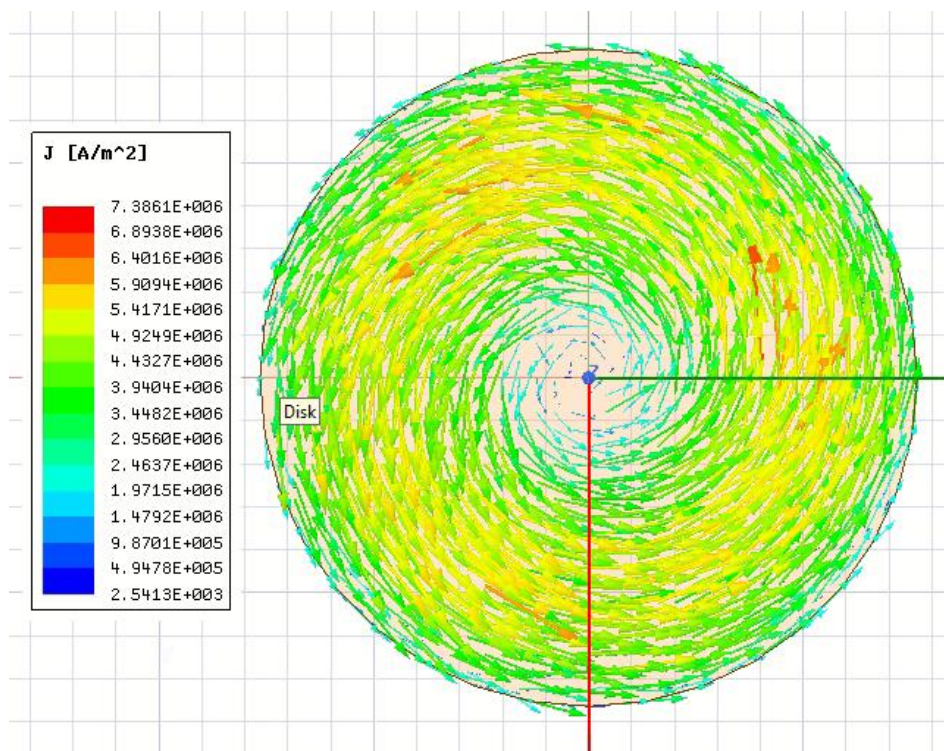


Ilustración 117. Distribución de corrientes para diámetro de **150 mm**  
(Simulación en software Ansys)

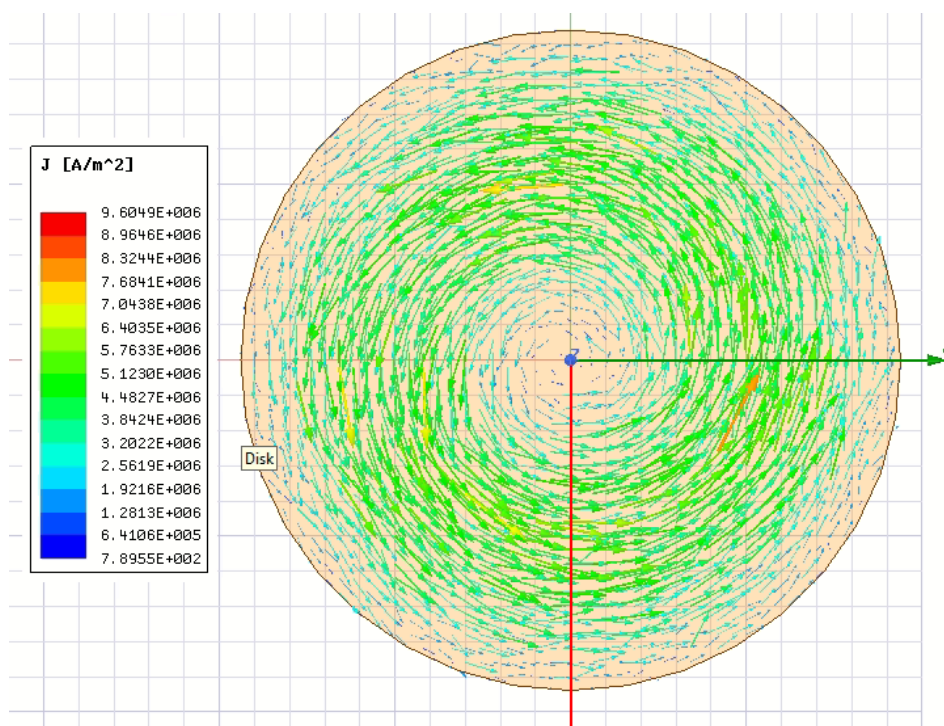
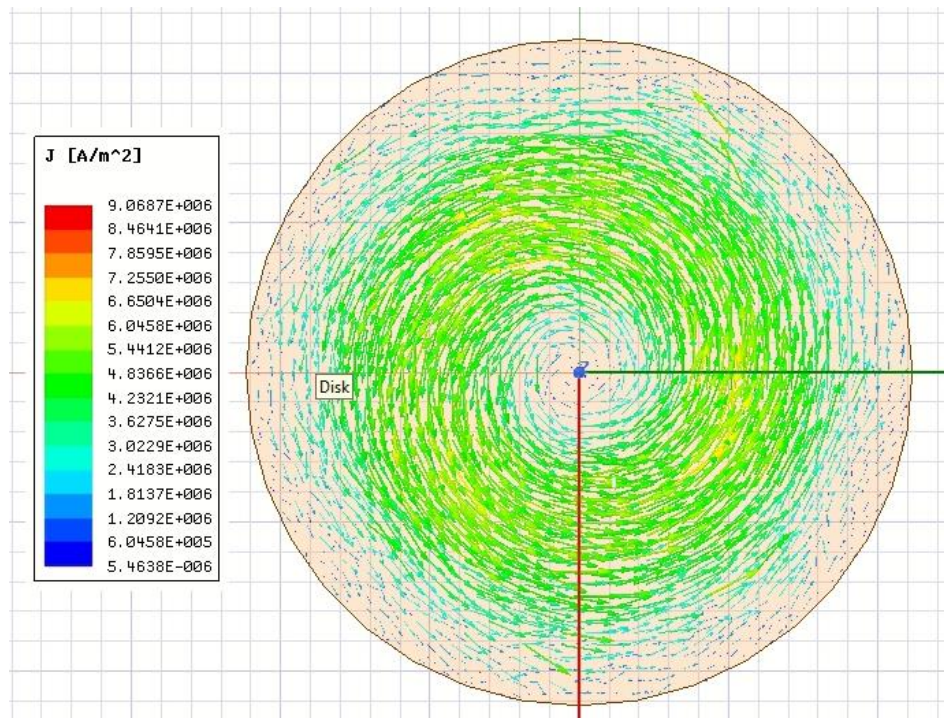


Ilustración 118. Distribución de corrientes para diámetro de **185 mm**  
(Simulación en software Ansys)





*Ilustración 119. Distribución de corrientes para un diámetro de **220 mm**  
(Simulación en software Ansys)*

Se observan los razonamientos explicados anteriormente para la inducción magnética y campo magnético llevados a las corrientes inducidas. Para el diámetro de 150 mm, se está desaprovechando potencia debido a que el recipiente al no ser lo suficientemente grande no se le pueden inducir todas las corrientes inducidas que la bobina inductora genera. Para el diámetro de 220 mm, tanto por la periferia como por el centro apenas circulan corrientes inducidas, por lo que por estas zonas prácticamente no se va a generar calor.

## PÉRDIDAS ÓHMICAS

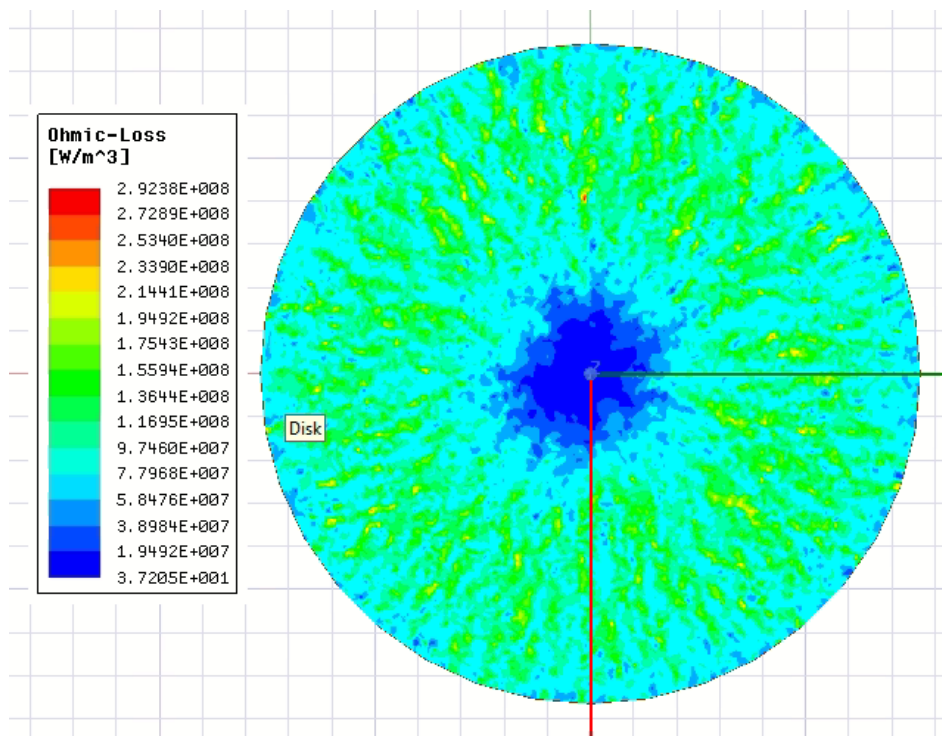


Ilustración 120. Distribución de pérdidas óhmicas para un diámetro de **150 mm**  
(Simulación en software Ansys)

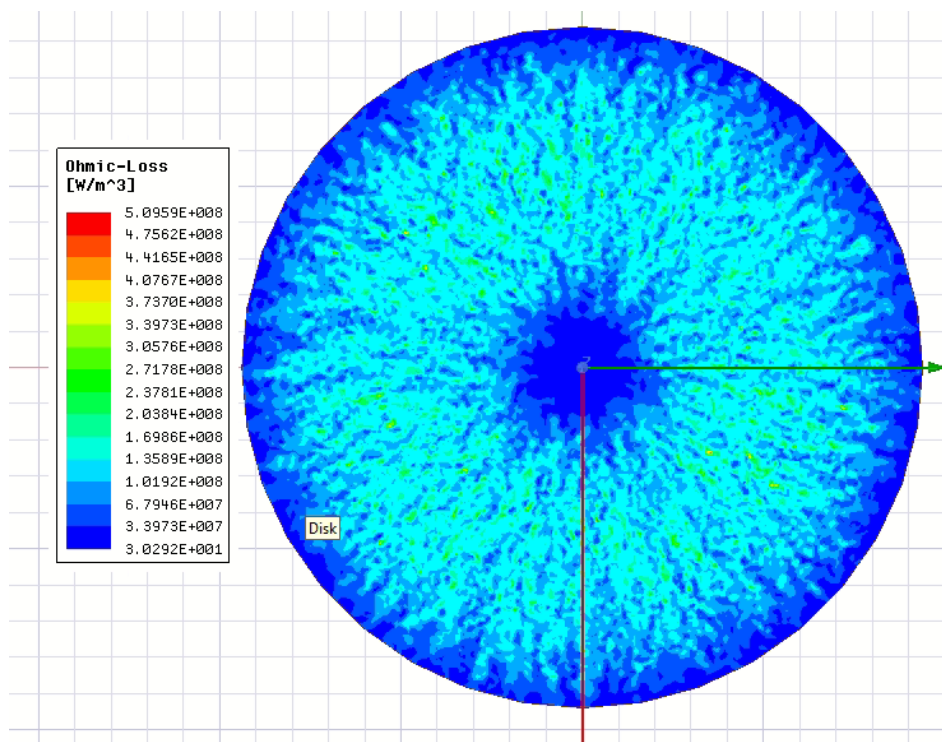
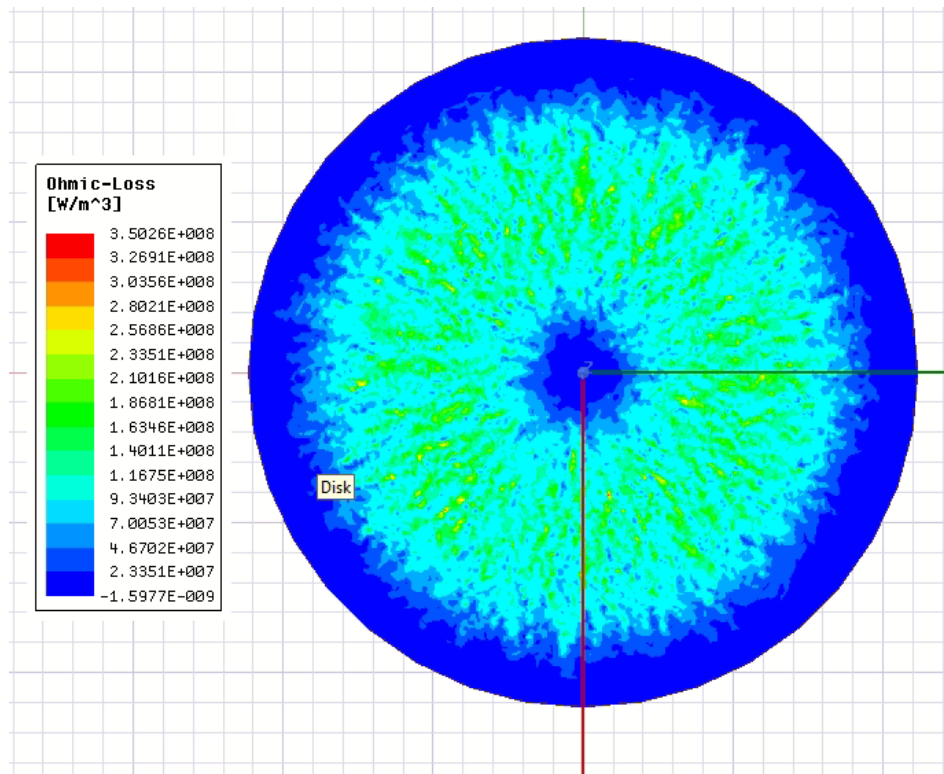


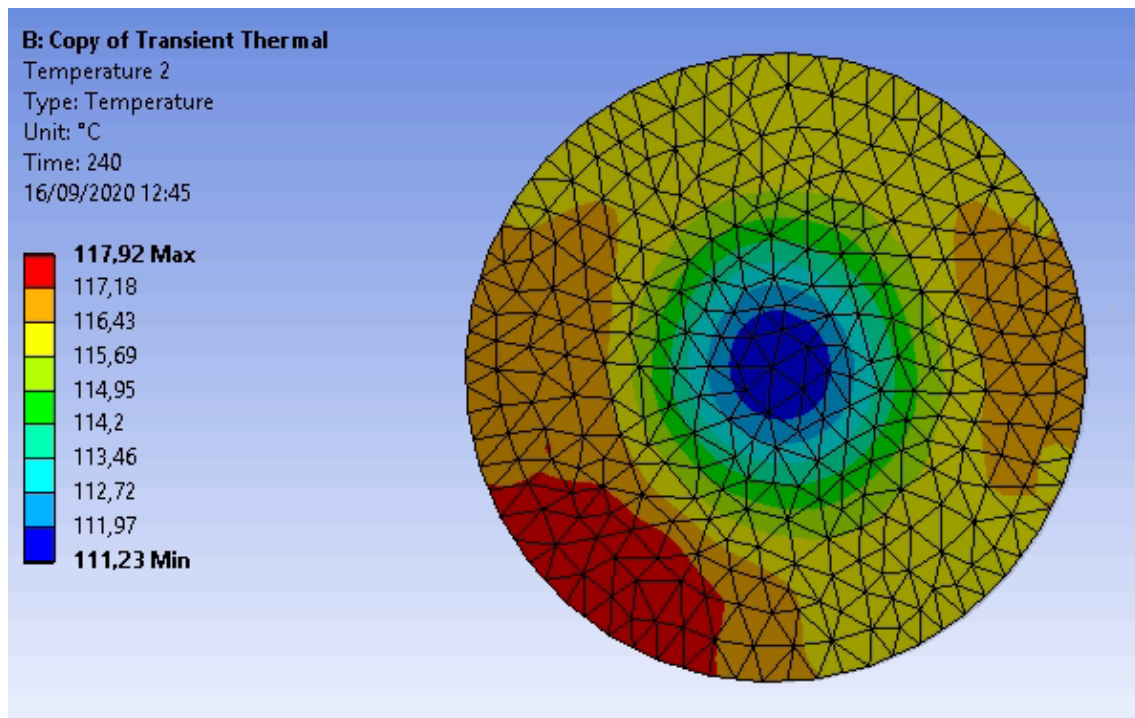
Ilustración 121. Distribución de pérdidas óhmicas para un diámetro de **185 mm**  
(Simulación en software Ansys)



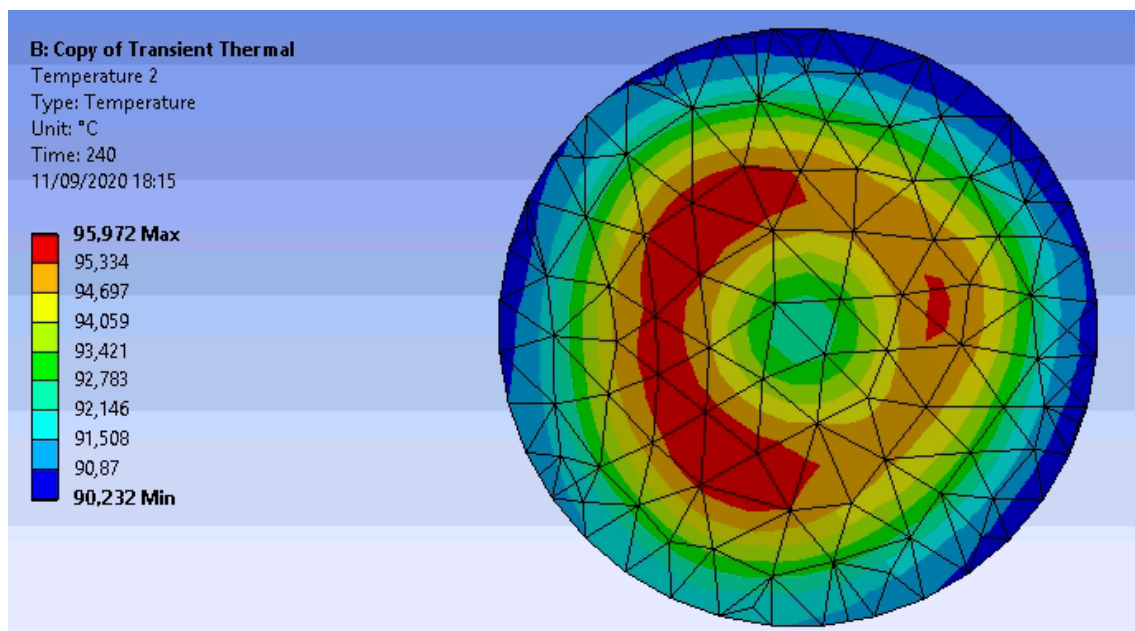
*Ilustración 122. Distribución de pérdidas óhmicas para un diámetro de **220 mm**  
(Simulación electromagnética en software Ansys)*

Las pérdidas óhmicas es la principal causa de generación de calor en la base del recipiente, este parámetro se encuentra muy vinculado con las corrientes inducidas, luego las conclusiones que se obtienen de estas distribuciones son muy similares.

## TEMPERATURA EN LA CARA EN CONTACTO CON COMIDA

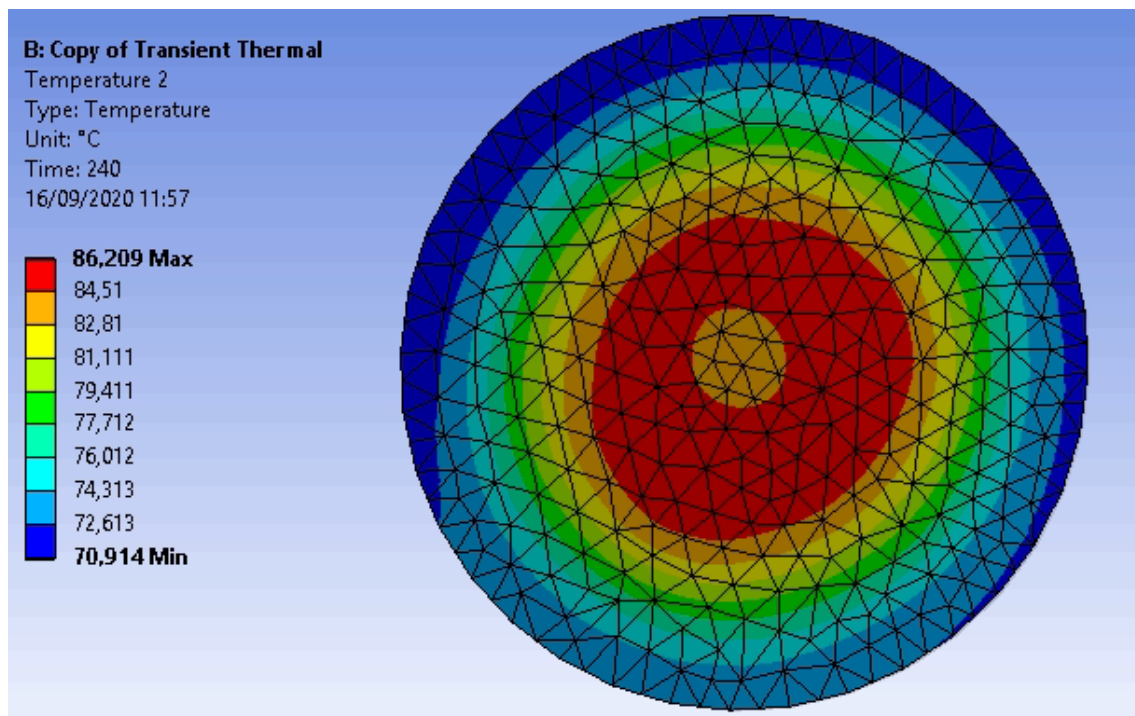


*Ilustración 123. Distribución de la temperatura para un diámetro de **150 mm**  
(Simulación electromagnética en software Ansys)*



*Ilustración 124. Distribución de la temperatura para un diámetro de **185 mm**  
(Simulación en software Ansys)*



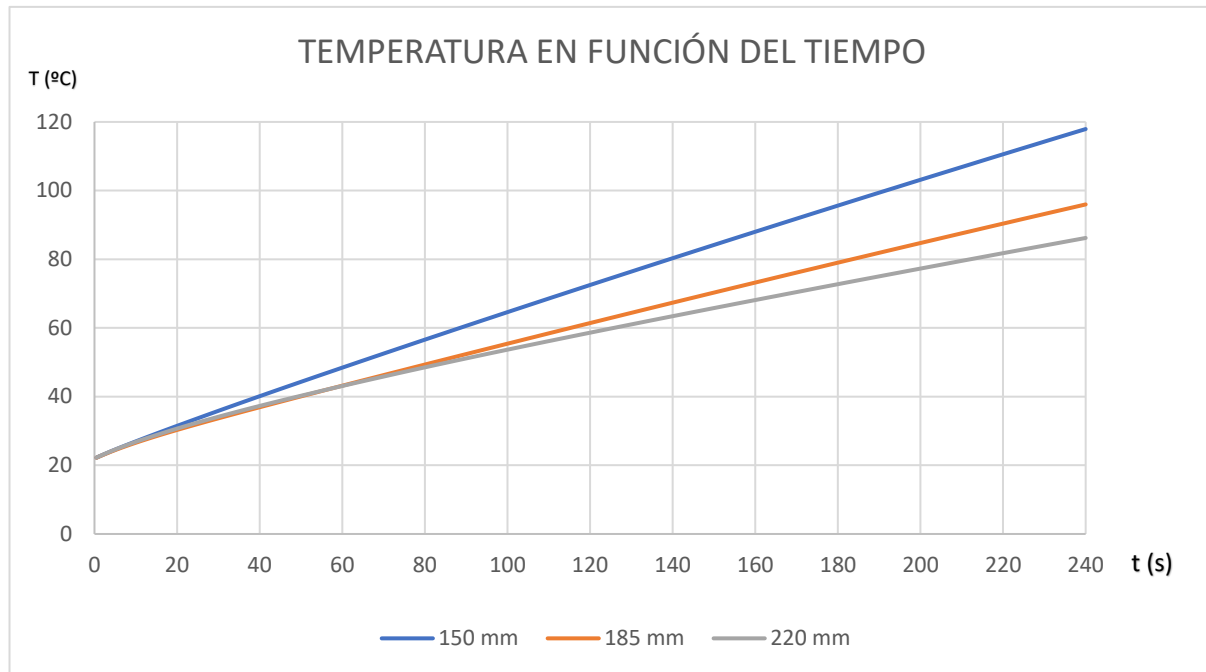


*Ilustración 125. Distribución de la temperatura para un diámetro de **220 mm**  
(Simulación en software Ansys)*

Se observa en las imágenes que cuanto menor es el diámetro más conecentradas y elevadas son las temperaturas, sin embargo, esto no implica que sea más óptimo. Para el diámetro de 150 mm, se está desperdiciando parte de la generación de calor, puesto que la bobina inductora para las mismas condiciones podría generar calor para un recipiente más grande. Sin embargo, para el diámetro de 220 mm, se ve en la imagen que la periferia no alcanza las temperaturas que se desean. Se concluye, igual que en las distribuciones anteriores, que la bobina debe ser del mismo tamaño que la base del recipiente.

## TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Se importa de un Excel un gráfico que representa la temperatura en función del tiempo para los diferentes diámetros de la base del recipiente.



*Ilustración 126. Gráfica de temperatura en función del tiempo para los diferentes diámetros del recipiente (Gráfica importada de Excel)*

En el eje de abscisas se sitúa el tiempo en segundos y en el de ordenadas la temperatura en grados centígrados, se ha desarrollado la simulación para un tiempo de 4 minutos.

## 11 CONCLUSIONES

En este proyecto se ha conseguido realizar un repaso histórico de la evolución del ser humano en el ámbito de la cocina. Con el paso del tiempo, se ha conseguido que la necesidad de comer pueda ser una experiencia agradable y de la cual poder disfrutar. Para ello, se ha realizado un repaso tanto de los acontecimientos históricos, como de los avances tecnológicos que han ido aconteciendo a lo largo de la historia y han influido en el desarrollo de las cocinas. También, se han presentado las ventajas y desventajas que presentan respecto al resto de cocinas que se comercializan en la actualidad, y de ahí entender la importancia que tienen estas hoy en día. Se ha logrado entender tanto el funcionamiento como los elementos que componen estas cocinas, así como complementar dicha explicación desarrollando los fundamentos teóricos que rigen su comportamiento.

Partiendo de datos reales proporcionados por la empresa TEKA se ha conseguido desarrollar dos simulaciones (electromagnética y térmica transitoria), de las cuales se han obtenido la magnitud y distribución de los parámetros estudiados (inducción magnética, campo magnético, densidad de corriente, pérdidas óhmicas y temperatura). Estos resultados se han validado y mostrado su coherencia mediante el cálculo analítico de la inducción magnética y de la obtención de datos reales de temperatura en la base del recipiente ferromagnético proporcionados por la empresa TEKA.

No se han conseguido proponer mejoras al diseño respecto a su eficiencia energética, ya que al trabajar en el proyecto y realizar un trabajo de investigación en todo a lo que las cocinas de inducción concierne, se ha entendido que se trata de una máquina muy eficiente, llegando a tomar valores cercanos al 99%. No obstante, se ha realizado un estudio de modificaciones geométricas del diseño, en las que se ha jugado con el espesor del cristal vitrocerámico y el diámetro del recipiente ferromagnético. De dicho estudio, se ha conseguido explicar la necesidad e importancia de elegir un espesor de cristal vitrocerámico adecuado, el cual satisfaga tanto las necesidades electromagnéticas como las necesidades de sustentación y protección. Y, el por qué, es importante que la bobina inductora sea del mismo tamaño que el recipiente ferromagnético en el que se va a cocinar.

Para futuras ampliaciones de estudio de este proyecto puede ser interesante analizar diferentes factores o modificaciones, se citan a continuación alguna de estas:

Utilizando el mismo software que se ha empleado en este proyecto, el software Ansys, y atendiendo a su eficiencia energética podría ser de interés analizar cómo varían los parámetros estudiados (inducción magnética, campo magnético, densidad de corriente, pérdidas óhmicas y temperaturas) al introducir una capa intermedia situada entre la base del recipiente ferromagnético y el cristal vitrocerámico, la cual simulase la suciedad que se puede llegar a acumular en dichos recipientes si no se lavan frecuentemente o adecuadamente.

Otro estudio interesante a realizar para analizar la eficiencia energética sería atender a las líneas de campo magnético, para ello se podría estudiar si el número o la geometría de las ferritas que se encuentran la cocina de inducción estudiada en este proyecto son las más adecuadas. O, si por el contrario, se pudiese lograr una mejor redirección de las líneas, obviamente cuanto menor número de líneas de campo magnético se pierdan sin llegar a la base del recipiente ferromagnético mayor será la eficiencia energética de la cocina de inducción. Dicho estudio se podría realizar con el mismo software que se está empleando, o con el software JMAG, este software es un programa especializada en simulaciones de dispositivos eléctricos.

## 12 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Marino, Alejo (24 de diciembre de 2018) *Historiando*. Recuperado de: <https://www.historiando.org/descubrimiento-del-fuego/>
- [2] Ibáñez, Juan José (noviembre de 2009) El Origen del Neolítico. *Investigación y Ciencia*. Recuperado de: <https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/origenes-493/el-origen-del-neolitico-1180>
- [3] Mójica Legarre, José Manuel (2020) La alimentación en la Prehistoria. *La alcazaba*. Recuperado de: <http://www.laalcazaba.org/la-alimentacion-en-la-prehistoria-por-jose-manuel-mojica-legarre/>
- [4] Bogado, Soledad (septiembre de 2015) La cocina en la prehistoria. *No sabes nada*. Recuperado de: <https://www.nosabesnada.com/historia/la-cocina-en-la-prehistoria/>
- [5] Directo al paladar (S.F.). Recuperado de: <https://www.directoalpaladar.com/cultura-gastronomica/historia-del-fuego-en-la-cocina>
- [6] Método 403 (abril de 2019). Recuperado de: <https://metodo403.com/cocina-prehistorica>
- [7] Prins, Arturo (2016). Larga y polémica historia de las patentes. Criterio Digital. Recuperado de: [https://www.revistacriterio.com.ar/bloginst\\_new/2016/06/18/larga-y-polemica-historia-de-las-patentes/](https://www.revistacriterio.com.ar/bloginst_new/2016/06/18/larga-y-polemica-historia-de-las-patentes/)
- [8] DPM especialidades (2017). Recuperado de: <http://dpmespecialidades.es/historia-de-las-cocinas-de-lena/>
- [9] Méndez, Elsie (2020). Sabores de Méjico. Recuperado de: <https://lossaboresdemexico.com/y-el-hombre-hizo-a-la-cocina-en-miles-de-anos/>
- [10] Martín, Javier (junio de 2019) EcuRed. Recuperado de: [https://www.ecured.cu/Cocina\\_de\\_Gas](https://www.ecured.cu/Cocina_de_Gas)

- [11] Urcuango Quinatoa, David (marzo de 2015). *Cocinas a inducción: importancia e impacto en la sociedad ecuatoriana y medio ambiente* (Proyecto de investigación). Instituto nacional Mejía. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/alexdk97/monografia-4>
- [12] Ingenieros Chirinos A. (S.F.). Butano y propano. Recuperado de: <https://www.diferencias.cc/butano-propano/>
- [13] Grupo Selectra (2013). Recuperado de: <https://elblogenergia.com/articles/que-gas-puedo-utilizar-en-mi-casa>
- [14] Martínez, Aurora (enero de 2020). La electricidad. *Concepto definición*. Recuperado de: <https://conceptodefinicion.de/electricidad/>
- [15] Martínez, Aurora (enero de 2020). La electricidad. *Concepto definición*. Recuperado de: <https://conceptodefinicion.de/electricidad/>
- [16] Mauricio, Javier (octubre de 2018). Lloyd: el hombre que inventó la cocina eléctrica. *Tapas*. Recuperado de: <https://tapasmagazine.es/lloyd-hombre-invento-la-cocina-electrica-la-cubitera-flexible/>
- [17] García Álvarez, José Antonio (febrero de 2016) Así funciona la cocina de inducción. Recuperado de: [http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af\\_cocina/af\\_cocina\\_induccion\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_cocina/af_cocina_induccion_1.htm)
- [18] González Ureña, Ángel (enero de 2009) La inducción electromagnética. *Investigación y Ciencia*. Recuperado de: <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/10/posts/la-induccion-electromagnetica-10178>
- [19] Tomé López, César (junio de 2016). El descubrimiento de la inducción electromagnética. *Cuaderno de cultura*. Recuperado de: <https://culturacientifica.com/2016/06/14/descubrimiento-la-induccion-electro-magnetica-1/>

- [20] González Ureña, Ángel (enero de 2009) La inducción electromagnética. *Investigación y Ciencia*. Recuperado de: <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/10/posts/la-induccion-electromagnetica-10178>
- [21] Roy, Armando (septiembre de 2013). Entrevista en Radio Aragón. Recuperado de: <http://www.aragonradio.es/podcast/emision/sabias-que%E2%80%A6-en-aragon-se-invento-la-placa-de-induccion-para-cocinar/>
- [22] García Álvarez, José Antonio (2016). Así funciona. Recuperado de: [http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af\\_cocina/af\\_cocina\\_induccion\\_3.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_cocina/af_cocina_induccion_3.htm)
- [23] Young, H. D. y Flores (2009). Sears-Zemansky (vol.1) México: Pearson Educación. Física Universitaria. Recuperado de: <https://www.fisic.ch/contenidos/termodin%C3%A1mica/trasferencia-del-calor/>
- [24] Bautista, Leandro (2016). Inducción electromagnética. *Fisicanet*. Recuperado de: <https://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrodinamica/ap15-induccion-electromagnetica.php>
- [25] Martín Blas, Teresa y Serrano Fernández, Ana (S. F.). Magnetismo. Universidad Politécnica de Madrid
- [26] Planas, Oriol (noviembre de 2018). Efecto Joule. *Demotor*. Recuperado de: <https://demotor.net/electricidad/efecto-joule>
- [27] Departamento de Tecnología Electrónica (noviembre de 2011). Magnetismo. Universidad de Vigo. Recuperado de: [http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web\\_electromagnetismo/magnetismo\\_perdidas\\_magneticas.htm](http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/magnetismo_perdidas_magneticas.htm)
- [28] Anónimo (S. F.). Histéresis magnética. *Fenómenos magnéticos y electromagnéticos*. Recuperado de: [https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/IEA/E/E04/es\\_IEA\\_E04\\_Contenidos/website\\_14\\_histresis\\_magntica\\_curva\\_de\\_histresis.html](https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/IEA/E/E04/es_IEA_E04_Contenidos/website_14_histresis_magntica_curva_de_histresis.html)

[29] Departamento de Tecnología Electrónica (noviembre de 2011). Magnetismo. Universidad de Vigo. Recuperado de: [http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web\\_electromagnetismo/magnetismo\\_perdidasmagneticas.htm](http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/magnetismo_perdidasmagneticas.htm)

[30] EcuRed contributors (agosto de 2019). Efecto pelicular. Recuperado de: [https://www.ecured.cu/index.php?title=Especial:Citar&page=Efecto\\_pelicular&id=3491192](https://www.ecured.cu/index.php?title=Especial:Citar&page=Efecto_pelicular&id=3491192)



